







Braunschweigische  
Wissenschaftliche Gesellschaft

# Jahrbuch 2005



**J. CRAMER Verlag · Braunschweig**  
**2006**

Das vorliegende Jahrbuch ist bei der Braunschweigischen Wissenschaftlichen  
Gesellschaft und im Buchhandel erhältlich  
Preis: € 16,00

Gedruckt mit Hilfe von Forschungsmitteln  
des Landes Niedersachsen

Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft  
Fallersleber-Tor-Wall 16 · D-38100 Braunschweig  
Postfach 3329 · D-38023 Braunschweig  
Telefon: (05 31) 1 44 66 · Fax (05 31) 1 44 60

<http://www.bwg-niedersachsen.de>

Für die Redaktion verantwortlich:  
Der Generalsekretär der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

ISSN 0931-1734  
ISBN 3-934656-19-6

Gesamtherstellung:  
J. Cramer Verlag · Am Hasengarten 23 A · D-38126 Braunschweig  
2006  
Printed in Germany

## INHALTSVERZEICHNIS

### ALLGEMEINES UND HISTORISCHES

Zur Geschichte der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (BWG) ..	7
Die Organe der BWG 1943 – 2005 .....	8
Satzung der BWG .....	10

### HINWEISE AUF VERANSTALTUNGEN DER BWG

Interdisziplinäres Symposium „Therapeutisches Klonen – ethisch verantwortbar?“ am 02.02.2005 .....	15
Symposium „150 Jahre nach Carl Friedrich Gauß – sein Wirken für die Technik heute“ am 09.11.2005 .....	17
Symposium „100 Jahre Messungen zur Umweltradioaktivität“ am 22.11.2005 .....	19
Weitere Veranstaltungen .....	21

### PLENARVERSAMMLUNGEN

15.01.2005	in Braunschweig	
	<i>Udo Peil</i> : Die große Kuppel von Florenz .....	23
	<i>Claus-Artur Scheier</i> , Der Generalsekretär der BWG	
	Schlussworte .....	35
11.02.2005	in Braunschweig	
	<i>Thomas Scheper &amp; Cornelia Kasper</i> : Tissue Engineering – Möglich- keiten und Perspektiven .....	37
11.03.2005	in Braunschweig	
	<i>Karl-Heinz Gericke</i> : Biophotonik: Einblicke in die Zelle .....	45
15.04.2005	in Braunschweig	
	<i>Klaus Alpers</i> : Metamorphosen als „hermeneutische Zeichen“. Entschlüsselung einer bisher unerkannten versteckten Handlungs- struktur im „Goldenen Esel“ des Apuleius (Ausführliche Fassung in den Abhandlungen 56 [2005])	
10.06.2005	in Braunschweig	
	<i>Michael Wiemers</i> : Der ‚hellische Kardinal‘ und seine Heiligen. Ein Beispiel aus dem Forschungsprojekt „Plastik in Mitteldeutschland von der Spätgotik bis zum Frühbarock“ Siehe: <a href="http://minerva.kunstgesch.uni-halle.de/">http://minerva.kunstgesch.uni-halle.de/</a>	
09.07.2005	in Clausthal-Zellerfeld	
	<i>Gudrun Schmidt-Naake</i> : Vom Polymer zur Brennstoffzelle .....	57

14.10.2005	in Braunschweig <i>Renate Stauf</i> : „Wer ist der Mensch, der sich vermessen will, des Zufalls schweres Steuer zu regieren?“ Kontingente Welt und problematisches Individuum in Schillers <i>Don Karlos</i> ..... 63	63
11.11.2005	in Hannover <i>Christian Heipke</i> : Die Mission Mars Express – Planetenbeobachtung mittels Photogrammetrie und Fernerkundung Siehe: HEIPKE C., ALBERTZ J., ATTWENGER M., BUCHROITHNER M., DORNINGER P., DORRER E., GEHRKE S., GWINNER K., LEHMANN H., MAYER H., OSTROVSKIY A., PACHER G., RENTSCH M., SCHMIDT R., SCHOLTEN F., SPIEGEL M., STILLA U., NEUKUM G. und das HRSC Co-Investigator Team, 2005: HRSC auf Mars Express – Photogrammetrische und kartographische Auswertungen, zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Land Management, 130. Jahrgang, Heft 6, pp. 379-386.	

#### KLASSENSITZUNGEN

##### Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften

11.02.2005	in Braunschweig <i>Peter Behrens</i> : Das Feste im Leben: Biomineralisation – Bioinspiration – Biomaterialien ..... 65	65
11.03.2005	in Braunschweig <i>Herbert Welling</i> : Vergleich deutscher und amerikanischer Forschung	
10.06.2005	in Braunschweig <i>Richard Pott</i> : Umweltverträgliche Grundwasserbewirtschaftung auf den Nordsee-Inseln, Steuerung durch Vegetationsmonitoring ..... 73	73
14.10.2005	<i>Dieter Jahn</i> : Moderne Mikrobiologie: Lernen von den Kleinen Siehe: Publikationen der TU Braunschweig: Innovation jenseits der Fachgrenzen. Ringvorlesungen an der TU Braunschweig im WS 2003/2004: „Systembiologie: Kann man Leben berechnen?“. Hrsg. BOHNET, M., H. HOPF, K. LOMPE & H. OBERBECK. S. 51-56. Braunschweig 2004.	
11.11.2005	<i>Karl Schügerl</i> : Optimierung der Produktion eines toxischen Fusionsproteins mit rekombinanten Bakterien ..... 93	93

##### Klasse für Ingenieurwissenschaften

11.02.2005	in Braunschweig <i>Manfred Lindmayer</i> : Anwendungen von Hochtemperatur-Supraleitern in der elektrischen Energieversorgung ..... 99	99
------------	--	----

11.03.2005	in Braunschweig <i>Werner Leonhard</i> : Sind wir bei der Nutzung erneuernder Energie- quellen auf dem richtigen Weg? .....	109
10.06.2005	<i>Ulrich Reimers</i> : Breitband-Infrastrukturen für mobile Mediennutzer .....	110
11.11.2005	<i>Werner Zielke</i> : Küstenmorphodynamik – Aspekte der Modellbildung .....	112

#### **Klasse für Geisteswissenschaften**

11.02.2005	in Braunschweig <i>Niklot Klüßendorf</i> : Die heilige Elisabeth im hessischen Münzbild (Ausführliche Fassung in den Abhandlungen 56 [2005])	
11.03.2005	in Braunschweig <i>Bernd Seidensticker</i> : Mythenkorrekturen .....	113
10.06.2005	in Braunschweig <i>Claus-Artur Scheier</i> : Programme und Spuren. Zur Differenz von Natur- und Geisteswissenschaften .....	115
14.10.2005	in Braunschweig <i>Hartmut Rötting</i> : Siedlungsräume an Oker und Schunter im früheren Mittelalter .....	123
11.11.2005	in Branschweig Regularien	

#### **FEIERLICHE JAHRESVERSAMMLUNG am 27. Mai 2005**

##### **Öffentliche wissenschaftliche Vorträge**

<i>Gottfried Landwehr</i> , Würzburg Halbleiter-Heterostrukturen in starken Magnetfeldern. Erste Anfänge in Braunschweig und neuere Ergebnisse aus Würzburg .....	133
<i>Rolf Haug</i> , Hannover Spineffekte beim Tunneln durch Halbleiternanostrukturen .....	151
<i>Markus Morgenstern</i> , Aachen Vermessung elektronischer Wellenfunktionen in Halbleitern: Von Quantenpunkten zu komplexeren Systemen .....	155
<i>Günter Weimann</i> , Freiburg Mit Quanteneffekten zu neuen Halbleiterbauelementen .....	169

##### **Festversammlung im Altstadtrathaus**

Der Präsident der BWG, <i>Joachim Klein</i> : Begrüßung und Bericht .....	175
--	-----

Der Niedersächsische Ministerpräsident, <i>Christian Wulff</i>	
Grußwort .....	186
<i>Ernst Otto Göbel</i> , Braunschweig	
Laudatio zur Verleihung der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille 2005 an <i>Klaus von Klitzing</i>	189
<i>Klaus von Klitzing</i>	
Einsteins Nobelpreis und die moderne Nanoelektronik	
Urkunde und Lebenslauf des Preisträgers .....	195
Der Generalsekretär der BWG, <i>Claus-Artur Scheier</i>	
Schlussworte .....	197
MITTEILUNGEN	
Veröffentlichungen .....	199
Geschäftliche Mitteilungen .....	199
PERSONALIA	
Todesfälle .....	200
Nachrufe .....	201
Zuwahlen .....	212
Inhaber der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille 1949 – 2005 .....	215
Mitgliederverzeichnis .....	219

## **ALLGEMEINES UND HISTORISCHES**

### **Zur Geschichte der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft**

Im Jahre 1943 führten die Initiativen einiger Professoren der Braunschweiger Technischen Hochschule Carolo Wilhelmina zur Errichtung der „Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft“. Sie wurde nach Genehmigung der vorgelegten Satzung durch den damals zuständigen Reichsminister für Wissenschaft, Erziehung und Volksbildung am 9. Dezember 1943 in einer feierlichen Sitzung konstituiert. Das zu diesem Anlaß von dem ersten Vorsitzenden des Senats der neuen Gesellschaft, Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmidt, erstattete Referat gibt Auskunft über die Motive dieser Gründung. Maßgebend war der Wunsch nach Überwindung eines allzu engen wissenschaftlichen Spezialistentums und einer einseitigen Orientierung der Forschung auf rasche Verwertbarkeit ihrer Ergebnisse. Dies wird in der ersten Satzung der Gesellschaft deutlich. In deren § 1 bestimmt sie: „insbesondere soll sie über die fachlichen Grenzen hinaus die Bearbeitung von Gemeinschaftsaufgaben übernehmen und dazu beitragen, innere Beziehungen zwischen allen Wissens- und Lebensgebieten herzustellen“. Organisatorisch war die Neugründung als selbständige wissenschaftliche Gesellschaft mit eigenen Organen (Kuratorium, Senat, Fachbereiche) angelegt. Der jeweilige Rektor der Technischen Hochschule Braunschweig war jedoch ex officio zum Präsidenten der Gesellschaft bestimmt, was hauptsächlich auf eine administrative Vereinfachung abzielte.

Bis Ende 1944 wurde die Gesellschaft durch Berufung von Mitgliedern aus verschiedenen Fachgebieten personell ausgebaut. Besondere Aktivitäten konnte sie in den letzten Monaten des zweiten Weltkrieges nicht mehr entfalten. Sie bestand auch nach dem Kriege unter einem kommissarischen Präsidenten unverändert fort. Jedoch wurden Maßnahmen eingeleitet, um die Gesellschaft uneingeschränkt zu verselbständigen, wobei die Organisationsform einer Akademie der Wissenschaften angestrebt wurde. Sie war im Kern durch Selbstergänzung und begrenzte Platzzahl der Mitglieder sowie durch Gliederung in Fachbereiche bereits vorhanden.

Vor allem wurde die Gesellschaft nun auch mit ihrem Plenum und ihren Abteilungen – seit 1950 Klassen – wissenschaftlich aktiv. In beiden Bereichen wurden wissenschaftliche Vorträge und Diskussionen durchgeführt. Initiiert von Prof. Dr. phil. Eduard Justi erschien 1949 der erste Band der als Publikationsorgan eingerichteten „Abhandlungen“. Im gleichen Jahre verlieh die Gesellschaft erstmalig die kurz zuvor gestiftete Carl-Friedrich-Gauß-Medaille. 1953 erhielt die Gesellschaft schließlich den Status einer Körperschaft des öffentlichen Rechts. Mit dem Errichtungserlaß des Niedersächsischen Landesministeriums wurde ihr zugleich eine neue Satzung gegeben, in der freilich Teile der ehema-

ligen Satzung erhalten geblieben waren. 1971 erhielt die Gesellschaft eine in einigen Bereichen veränderte und schließlich 1993 ihre heute gültige Satzung, die sie im Geiste einer Akademie der Wissenschaften mit deutlich technischem Schwerpunkt auszufüllen bestrebt ist. In diesem Rahmen finden laufend wissenschaftliche Plenar- und Klassensitzungen statt. Zur Durchführung langfristiger Forschungsvorhaben hat die BWG eine Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte, eine Kommission für Umwelt und Technik und eine Kommission für Recht und Technik eingesetzt. Von den jährlich erscheinenden „Abhandlungen“ sind bisher 54 Bände und in der Schriftenreihe der Kommission für Niedersächsische Bau- und Kunstgeschichte 7 Bände publiziert worden. Initiiert von Prof. Dr. techn. Karl Heinrich Olsen, veröffentlicht die BWG seit 1983 Jahrbücher, die insbesondere über Vortragsveranstaltungen, Kommissions-tätigkeiten und Personalien berichten.

### Die Organe der BWG 1943 - 2005

Konstituierende Sitzung:	30.11.1943	
Eröffnungssitzung:	09.12.1943	[siehe Abhandlungen der BWG <b>21</b> (1969), 8]
Erste Sitzung:	1944	[siehe Abhandlungen der BWG <b>1</b> (1949), 169]
Zweite Sitzung:	1953	[siehe Abhandlungen der BWG <b>5</b> (1953), 212]
Dritte Sitzung:	1971	[siehe Abhandlungen der BWG <b>22</b> (1970), 291]
Vierte Sitzung:	1993	[hier abgedruckt S. 10 ff.]

### Präsidenten

1943-45: Fritz Gerstenberg; 1946-48: Gustav Gassner; 1949-50: Hans Herloff Inhoffen; 1951-53: Eduard Justi; 1954-56: Leo Pungs; 1957-59: Max Kohler; 1960-62: Hans Kroepelin; 1963-66: Paul Koeßler; 1967-70: Hermann Blenk; 1971-77: Karl Gerke; 1978-80: Herbert Wilhelm; 1981-86: Karl Heinrich Olsen; 1987-92: Gerhard Oberbeck; 1993-95: Werner Leonhard; 1996-1999: Norbert Kamp; seit 2000: Joachim Klein.

### Generalsekretäre

1943-45: Ernst August Roloff; 1946-48: Wilhelm Gehlhoff; 1949-50: Eduard Justi; 1951-53: Hermann Schlichting; 1954-1959: Hans Herloff Inhoffen; 1960-61: Hellmut Bodemüller; 1962-64: Hans Joachim Bogen; 1965-69: Hermann Schaefer; 1970-71: Karl Gerke; 1972-73: Arnold Beuermann; 1974-80: Karl Heinrich Olsen; 1981-82: Ulrich Wannagat; 1983-85: Hans Joachim Kanold; 1986-88: Egon Richter; 1989-91: Harmen Thies; 1992-94: Ulrich Wannagat; 1995-97: Helmut Braß; 1998-2000: Elmar Steck; seit 2001: Claus-Artur Scheier.



## Vorsitzende der Klassen

### BIS 1954 SEKRETÄRE DER ABTEILUNGEN

#### *Mathematik und Naturwissenschaften*

1943-47: G. Cario; 1948-50: P. Dorn; 1951-53: H.H. Inhoffen; 1954-57: P. Dorn; 1958-60: H. Kroepelin; 1961: H. Poser; 1962-64: H. Hartmann; 1965-66: H. Schumann; 1967-72: M. Grützmaker; 1973-76: U. Wannagat; 1977-80: H.R. Müller; 1981-84: E. Richter; 1985-89: O. Rosenbach; 1990-91: St. Schottlaender; 1992-94: H.-J. Kowalsky; 1995-97: H. Tietz; 1998-1999: K. Schügerl; 2000: G. Müller; 2001-2003: J. Heidberg; seit 2004: E. Winterfeldt.

#### *Ingenieurwissenschaften*

1943-48: E. Marx; 1949-53: L. Pungs ; 1954-56 : O. Flachsbart; 1957-60: W. Hofmann; 1961-64: H. Hausen; 1965-70: G. Wassermann; 1971-77: H.W. Hennicke; 1978-79: Th. Rummel; 1980-83: M. Mitschke; 1984-93: R. Jeschar; 1994-96: H.-G. Unger; 1997-2000: E. Stein; seit 2001: M. Lindmayer.

#### *Bauwissenschaften*

1943-48: ?; 1949-53: Th. Kristen; 1954-62: F. Zimmermann; 1963-67: A. Pflüger; 1968-69: J. Göderitz; 1970-73: W. Wortmann; 1974: K.H. Olsen; 1975-78: H. Duddeck; 1979-83: W. Höpcke; 1984-93: J. Herrenberger; seit 1994: vereinigt mit der Klasse für Ingenieurwissenschaften.

#### *Geisteswissenschaften*

1943-48: W. Jesse; 1949-53: W. Gehlhoff; 1954-57 (Obmann): W. Jesse; 1958-61 (Obmann): H. Glockner; 1962-68 (Obmann): H. Heffter; 1969-78: A. Beuermann; 1979-87: M. Gosebruch; 1988-89: H. Boeder; 1990-91: G. Maurach; 1992-1998: C.-A. Scheier; 1999: G. Maurach; 2000: C.-A. Scheier; seit 2001: H.-J. Behr.

# **Satzung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft**

(In Kraft seit 6.4.1993)

## **§ 1**

Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft hat durch eigene Tätigkeit und im Zusammenwirken mit anderen Gesellschaften der Wissenschaft zu dienen.

## **§ 2**

Die Gesellschaft ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts. Ihr Sitz ist Braunschweig. Sie führt ein Dienstsiegel.

## **§ 3**

Die Gesellschaft hat drei Klassen:

- die Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften,
- die Klasse für Ingenieurwissenschaften,
- die Klasse für Geisteswissenschaften.

## **§ 4**

(1) Die Gesellschaft besteht aus ordentlichen und korrespondierenden Mitgliedern.

(2) Ordentliche Mitglieder können verdienstvolle Gelehrte werden, die ihren Wohnsitz in Niedersachsen haben. Sie sind zur regelmäßigen Teilnahme an den Sitzungen des Plenums und ihrer Klassen sowie zur Förderung der wissenschaftlichen Arbeiten verpflichtet und gehalten, zu den Publikationen der Gesellschaft beizutragen. Ordentliche Mitglieder, die das 70. Lebensjahr vollendet haben, werden von den Pflichten entbunden, behalten jedoch ihre Rechte bei. Die Höchstzahl der ordentlichen Mitglieder, welche das 70. Lebensjahr noch nicht vollendet haben, beträgt:

- 30 für die Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften,
- 40 für die Klasse für Ingenieurwissenschaften,
- 30 für die Klasse für Geisteswissenschaften.

(3) Zu korrespondierenden Mitgliedern können, ohne Rücksicht auf ihren Wohnsitz, verdienstvolle Gelehrte berufen werden, denen eine regelmäßige persönliche Teilnahme an den Sitzungen und Arbeiten der Gesellschaft nicht möglich ist. Sie können an allen Sitzungen teilnehmen, haben aber kein Stimmrecht. Die Zahl der korrespondierenden Mitglieder ist nicht beschränkt.

(4) Ordentliche Mitglieder, die ihren Verpflichtungen nicht nachzukommen vermögen, können die Überführung in den Status eines korrespondierenden Mitglieds beantragen. Von ordentlichen Mitgliedern, die ohne gerechtfertigten Grund vier aufeinanderfolgenden Sitzungen des Plenums oder ihrer Klasse ferngeblieben sind, muß angenommen werden, daß sie ihren Verpflichtungen nicht mehr nachzukommen vermögen. Auf Vorschlag ihrer Klasse kann durch den Verwaltungsausschuß die Mitgliedschaft in die eines korrespondierenden Mitglieds umgewandelt werden.

#### § 5

(1) Die Mitglieder werden auf Vorschlag von mindestens drei ordentlichen Mitgliedern und nach Antrag der zuständigen Klasse durch das Plenum in geheimer Abstimmung gewählt.

(2) Auf die Mitgliedschaft kann durch schriftliche Erklärung gegenüber dem Präsidenten verzichtet werden.

(3) Ein Mitglied kann wegen ehrenrührigen Verhaltens ausgeschlossen werden. Für das Verfahren gelten die Vorschriften über die Wahl.

#### § 6

(1) Im Plenum und in den Klassen berichten die Mitglieder über eigene Arbeiten und die ihrer Mitarbeiter, die ordentlichen Mitglieder auch über Arbeiten anderer. Der Vorsitzende kann zum wissenschaftlichen Teil der ordentlichen Sitzungen Gäste, die von einem ordentlichen Mitglied eingeführt sind, einladen.

(2) Das Plenum hält in jedem Jahr mindestens eine Hauptsitzung ab. Es hört und erörtert Rechenschaftsberichte. Zu den Hauptsitzungen sind auch die korrespondierenden Mitglieder einzuladen.

#### § 7

Die Gesellschaft gibt die „Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft“ sowie ein „Jahrbuch“ heraus. Einzelheiten regelt die Druckschriftenordnung.

#### § 8

Die Gesellschaft kann darüber hinaus eigene Forschungsarbeiten durchführen, Forschungsarbeiten ihrer Mitglieder oder Dritter unterstützen, wissenschaftliche Stellungnahmen abgeben und wissenschaftliche Tagungen, Symposien sowie Vorträge veranstalten. Um der Öffentlichkeit Einblick in wissenschaftliche Probleme zu geben und sie mit den Ergebnissen wissenschaftlicher Arbeit bekanntzumachen, veranstaltet die Gesellschaft auch öffentliche Vorträge. Ferner kann die Gesellschaft wissenschaftliche Schriften und Berichte herausgeben oder ihre Herausgabe unterstützen.

## § 9

Die Gesellschaft verleiht, in der Regel jährlich zum Geburtstag von Carl Friedrich Gauß am 30. April, die „Carl-Friedrich-Gauß-Medaille“. Das Verfahren regeln die besonderen Bestimmungen für die Verleihung der Gauß-Medaille.

## § 10

(1) Die Leitung der Gesellschaft obliegt dem Präsidenten. Er beruft die Sitzungen des Plenums ein, stellt die Tagesordnung fest, leitet die Verhandlungen, hat bei allen mündlichen Abstimmungen für den Fall der Stimmengleichheit die entscheidende Stimme, führt den Vorsitz in allen Ausschüssen – soweit nicht andere Regelungen getroffen sind –, unterzeichnet die Sitzungsprotokolle und sorgt für die Ausführung der Beschlüsse. Er vertritt die Gesellschaft nach außen und hat die Aufsicht über die Geschäftsführung im Benehmen mit den Klassenvorsitzenden.

(2) Der Präsident wird aus dem Kreis der ordentlichen Mitglieder durch das Plenum in geheimer Abstimmung für die Amtsdauer von drei Jahren gewählt. Wiederwahl ist zulässig. Ersatzwahlen erfolgen für den Rest der Amtsdauer.

(3) Die Stellvertretung des Präsidenten übernimmt als Vizepräsident der turnusmäßig älteste Klassenvorsitzende.

## § 11

(1) Die Leitung der Klassen obliegt den Klassenvorsitzenden; § 10 Abs. 1 Satz 2 gilt entsprechend.

(2) Die ordentlichen Mitglieder jeder Klasse wählen aus ihrem Kreis in geheimer Abstimmung den Klassenvorsitzenden so, daß jedes Jahr einer der Klassenvorsitzenden ausscheidet. Wiederwahl ist zulässig. Ersatzwahlen erfolgen für den Rest der Amtsdauer.

(3) Die Klassenvorsitzenden betrauen mit ihrer Vertretung von Fall zu Fall ein ordentliches Mitglied der Klasse.

## § 12

(1) Dem Generalsekretär obliegen die Geschäftsführung, die Veranstaltung öffentlicher Vorträge und die Herausgabe von Veröffentlichungen der Gesellschaft.

(2) Der Generalsekretär muß seinen Wohnsitz in Braunschweig oder im näheren Umkreis von Braunschweig haben. Er wird aus dem Kreis der ordentlichen Mitglieder durch das Plenum in geheimer Abstimmung für die Amtsdauer von drei Jahren gewählt. Wiederwahl ist zulässig. Ersatzwahlen erfolgen für den Rest der Amtsdauer. In dem Jahr, in dem der Präsident neu gewählt wird, soll ein Wechsel im Amt des Generalsekretärs nicht stattfinden.

## § 13

Der Präsident, die Klassenvorsitzenden und der Generalsekretär bilden den Verwaltungsausschuß. Dieser hat die Aufgabe, über Arbeitsvorhaben und Arbeitsweise der Gesellschaft zu beschließen, den Haushaltsplan aufzustellen und über Inventar und Vermögen der Gesellschaft im Rahmen der Beschlußfassung des Plenums zu verfügen. Der Präsident kann zur Beratung des Verwaltungsausschusses Mitglieder der Gesellschaft und andere Persönlichkeiten, deren Teilnahme im Interesse der Gesellschaft liegt, hinzuziehen.

## § 14

(1) Der Haushaltsplan ist vor Beginn des Haushaltsjahres (Kalenderjahr) aufzustellen und vom Plenum zu beschließen.

(2) Überschüsse früherer Jahre verbleiben der Gesellschaft; sie sind im Haushaltsplan auszuweisen.

(3) Die Gesellschaft hat nach Ende eines jeden Haushaltsjahres eine Rechnung aufzustellen. Die Rechnung ist, unbeschadet einer Prüfung durch den LRH nach § 111 LHO, durch die bei der Bezirksregierung Braunschweig eingerichtete Vorprüfungsstelle zu prüfen. Die Prüfung soll sich auf die Ordnungsmäßigkeit der Rechnungslegung sowie auf die wirtschaftliche und satzungsgemäße Verwendung der Mittel erstrecken.

Das Plenum beschließt ferner über die Entlastung des Verwaltungsausschusses. Die Entlastung bedarf der Genehmigung des MWK und des MF.

## § 15

Das Plenum beschließt ferner über die Geschäftsordnung, Druckschriftenordnung, Bestimmungen über die Verleihung der Gauß-Medaille und über Änderungen dieser Satzung.

## § 16

(1) Zu Wahlen und Beschlußfassungen gemäß § 14 Abs. 1 und 3 und § 15 muß mindestens die Hälfte der Anzahl der ordentlichen Mitglieder unter 70 Jahren anwesend sein.

(2) Die Wahlen und die Beschlüsse über Satzungsänderungen erfordern eine Stimmenmehrheit von zwei Dritteln aller anwesenden stimmberechtigten Mitglieder. Führt bei der Wahl des Präsidenten und des Generalsekretärs der erste Wahlgang zu keiner Zweidrittelmehrheit, so findet sofort ein zweiter Wahlgang statt. Wird auch hierbei die Zweidrittelmehrheit nicht erzielt, so ist in einem dritten Wahlgang gewählt, wer die absolute Mehrheit erreicht. Notfalls ist eine Stichwahl durchzuführen. Bei Stimmengleichheit entscheidet das Los.

(3) Bei den übrigen Beschlußfassungen und sonstigen Abstimmungen entscheidet die einfache Mehrheit der stimmberechtigten Anwesenden.

(4) Ordentliche Mitglieder können ihr Stimmrecht durch schriftliche Vollmacht auf ein anderes ordentliches Mitglied übertragen; in diesem Fall gelten sie als anwesend.

#### § 17

(1) Die Wahl des Präsidenten und des Generalsekretärs bedarf der Bestätigung durch die LReg.

(2) Der Haushaltsplan und Änderungen dieser Satzung bedürfen der Genehmigung durch die LReg.

(3) Das Ergebnis der Wahlen der ordentlichen Mitglieder und der Klassenvorsitzenden, der Ausschluß eines Mitglieds und der Verzicht eines Mitglieds auf die Mitgliedschaft sind der LReg. anzuzeigen.

#### **Übergangsbestimmungen**

Die Satzung tritt mit dem Tag der Genehmigung in Kraft. Befristet auf fünf Jahre nach dem Inkrafttreten der Satzung können der Klasse für Ingenieurwissenschaften bis zu 45 ordentliche Mitglieder unter 70 Jahren angehören, wobei die Höchstzahl aller ordentlichen Mitglieder unter 70 Jahren in der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft auf 100 begrenzt bleibt.

## Symposium

### Therapeutisches Klonen – ethisch verantwortbar?

*am 2. Februar 2005  
in Braunschweig*

Die biotechnologischen Fortschritte im Bereich der Molekulargenetik und Genomik stellen Individuum und Gesellschaft vor ungeahnte zu verantwortende Herausforderungen. Die Herstellung genetisch identischer Embryonen, das Klonen zum Zweck der Reproduktion ist zwar verboten. Wie ist es aber mit dem gut gemeinten Ziel „therapeutischen Klonens“, d. h. der Herstellung gen-identischen Gewebes für chronisch Kranke (mit Alzheimer-Demenz, Parkinson, koronarer Herzkrankheit oder Herzinsuffizienz o. a.), für die (derzeit) keine medikamentöse Therapie verfügbar ist, für die sich aber eine Zell- oder Gewebersersatztherapie ergeben könnte? Auch hierzu ist die fremdzweckliche Erzeugung menschlicher Embryonen zur Stammzellgewinnung für die Züchtung implantierbaren Gewebes erforderlich. Anders als bei der *In-vitro*-Fertilisation und dem anschließenden Embryonentransfer in die Gebärmutter einer Frau mit unerfülltem Kinderwunsch liegen Handlungsabsicht und spätere Verwendung des geklonten Embryos im Interesse der Behandlung einer Drittperson, um deretwillen die Kontinuität des embryonalen Entwicklungsprozesses zerstört wird. Damit stellt sich die Frage, ob das Lebensschutzgebot für das zukünftige Kind höher zu werten ist als der Heilauftrag für den chronisch Leidenden. Ist die Instrumentalisierung des Embryos und der Eizellspenderin für die Zwecke Dritter zulässig? Ändert diese Technik das Selbstverständnis der Frau? Werden mit der Fremdnutzung des Embryos nicht der Mensch in seinem moralischen Selbstverständnis und die auch dem ungeborenen Kind eigene Unverfügbarkeit verletzt?

Anknüpfend an unserem Stammzell-Symposium vom Januar 2004 will die Veranstaltung nach einer Darstellung der biologischen Grundlagen des therapeutischen Klonens die forschungspolitischen und forschungsrechtlichen, die philosophischen und theologischen Probleme beleuchten und diskutieren.

Dr. Friedrich Weber  
Landesbischof

Prof. Dr. Claudia Wiesemann  
Präsidentin der Akademie  
für Ethik in der Medizin  
Göttingen

Prof. Dr. Joachim Klein  
Präsident der  
Braunschweigischen Wissen-  
schaftlichen Gesellschaft

- 14.00 Uhr *Begrüßung und Einführung*  
Landesbischof Dr. Friedrich Weber  
Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Klein
- 14.15 Uhr Prof. Dr. Rudolf Balling, Präsident Gesellschaft für Biotechnologische Forschung, Braunschweig, Präsident der Deutschen Gesellschaft für Genetik.  
*Was ist überhaupt therapeutisches Klonen?*  
  
Aussprache
- 15.00 Uhr Dr. Carola Reimann, Mitglied des Deutschen Bundestages  
*Hat das therapeutische Klonen in Deutschland eine Chance?*  
*Fragen an Politik und Gesetzgebung.*  
  
Aussprache
- 15.45 Uhr Pause
- 16.15 Uhr Dr. Hermann Barth, Vizepräsident, Kirchenamt der Evangelischen Kirche in Deutschland, Hannover  
*Rechtfertigung durch Heilungshoffnungen? Einige gute Gründe gegen das so genannte therapeutische Klonen.*
- 17.00 Uhr Prof. Dr. Jan P. Beckmann, Institut für Philosophie, Fernuniversität Hagen  
*Ist therapeutisches Klonen rechtfertigungsfähig?*
- 17.45 Uhr Prof. Dr. Claudia Wiesemann, Präsidenten der Akademie für Ethik in der Medizin e. V., Göttingen  
*Schlusswort*
- Veranstalter: Evangelisches Klosterforum, Braunschweig  
Akademie für Ethik in der Medizin e. V., Göttingen  
Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft
- Ort: Kongressaal der Industrie- und Handelskammer Braunschweig,  
Am Altstadtmarkt



## Symposium

### 150 Jahre nach Carl Friedrich Gauß – sein Wirken für die Technik heute

*am 9. November 2005  
in Braunschweig*

Carl Friedrich Gauß, 1777 in Braunschweig geboren, vor 150 Jahren 1855 in Göttingen verstorben, war nicht nur ein großer Mathematiker, sondern hat auch in Physik, Geodäsie, Astronomie, Telegraphie grundlegend Neues erdacht und erprobt. Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft (BWG) hat ihn zum Leitbild. Sie verleiht alljährlich in ihrer Jahresfeier die Gauß-Medaille (2005 an Klaus von Klitzing).

acatech, 2002 gegründet, ist auf dem Wege zu einer Länder übergreifenden Akademie der Technikwissenschaften. BWG und acatech wollen zum Abschluss des Gauß-Jahres in Braunschweig des großen Sohnes dieser Stadt gedenken, indem sie ausgewiesene Wissenschaftler, vom Philosophen bis zum Optoelektroniker, berichten lassen, was mit Gauß für die Technik des 21. Jahrhunderts begann, zugleich auch beispielhaft, was Technik heute leistet.

Eine allgemein verständliche Präsentation wird es einem breiten Interessentenkreis ermöglichen, mit Gewinn den Spuren von Gauß zu folgen.

- |           |  |
|-----------|--|
| 9.30 Uhr  | <p><i>Begrüßung und Einführung</i><br/>         Prof. Dr.rer.nat. Dr.h.c. Joachim Klein, Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft</p> <p><i>Grußwort acatech</i><br/>         Prof.em. Dr.-Ing. Dr.-Ing.E.h.mult. Dr. h.c.mult. Günter Spur, Vorstandsmitglied acatech, München</p> <p><i>Was mit Carl Friedrich Gauß begann</i><br/>         Prof. Dr.phil. Hans Poser, Institut für Philosophie, TU Berlin</p> <p><i>Gauß, die Zahlen und die reelle Welt</i><br/>         Prof. Dr. Samuel James Patterson, Mathematisches Institut, Georg August Universität Göttingen</p> |
| 11.45 Uhr | <p><i>Von Extremalprinzipien zur Computation-Mechanics</i><br/>         Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Ekkehard Ramm, Institut für Baustatik, Universität Stuttgart</p>  |

*Von der Gaußschen Glockenkurve zur Satelliten-Geodäsie*

Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover

14.00 Uhr

*Die Magnetfelder des Weltraumes*

Prof. Dr.rer.nat. Karl-Heinz Glaßmeier, Institut für Geophysik und Meteorologie, TU Braunschweig

*Vom Telegrafen zum Handy*

Prof. Dr.rer.nat. Friedrich Jondral, Institut für Nachrichtentechnik, Universität Karlsruhe

15.30 Uhr

*Was Gauß mit der Robotik zu tun hat*

Frau Dr.-Ing. Ulrike Phleps für Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Vorstandsmitglied IWKA AG, Karlsruhe

*Organische Halbleiter für die Optoelektronik*

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kowalsky, Institut für Hochfrequenztechnik, TU Braunschweig

16.40 Uhr

SCHLUSSWORTE

## Symposium

### Über 100 Jahre Messungen zur Umweltradioaktivität Julius Elster und Hans Geitel zum 150. Geburtstag gewidmet

*am 22. November 2005  
in Braunschweig und Wolfenbüttel*

10.30 Uhr      Exkursion Wolfenbüttel  
14.30 Uhr      Symposium, Aula TU Braunschweig

Originell als Physiker, originell in ihren Forschungsansätzen und originell in ihrem Freundschaftsbund drückten Julius Elster und Hans Geitel zwischen 1880 und 1920 der naturwissenschaftlichen Forschung ihren Stempel auf. Dabei waren die Arbeitsbedingungen bescheiden: Sie hatten einen Kellerraum in ihrem Wohnhaus in Wolfenbüttel zu einem Labor ausgebaut, und sie hatten für ihre Forschungen nur die Zeit zur Verfügung, die ihnen neben ihrer beruflichen Tätigkeit als Lehrer blieb.

Sie sind die Erfinder der Fotozelle und Begründer der lichtelektrischen Fotometrie. Für Untersuchungen zur Elektrizitätsleitung in Gasen und im Vakuum konstruierten sie Glaszellen mit beheizter Glühkathode. Sie leiteten eine neue Phase luftelektrischer Forschungen ein, als sie die Ionenlehre auf den Bereich der atmosphärischen Elektrizität übertrugen. Als Ionenerzeuger erkannten sie die Umweltradioaktivität. Aus dem Vorkommen radioaktiver Elemente im Erdreich ermittelten sie rechnerisch deren Einfluss auf die Erdwärme.

Bei der Auseinandersetzung mit dem Phänomen der Radioaktivität gingen Elster und Geitel weit über geophysikalische Fragestellungen hinaus. So suchten sie beispielsweise nach einer Beeinflussung der Strahlenausbreitung durch Magnetfelder. Etwa gleichzeitig zu dem Physiker Crookes entdeckten sie die Szintillation von Zinksulfid und sie sind die eigentlichen Entdecker des Radiothor. Sie durchbrachen das Dogma von der Unwandelbarkeit der Elemente, indem sie die Strahlung als Ergebnis von Atomzerfallsprozessen interpretierten und eine Zerfallskette radioaktiver Elemente postulierten.

Ebenso bemerkenswert wie ihr Hobby, ist der Lebensweg von Elster und Geitel. Als Nachbarkinder hatten sie sich bereits im Alter von sechs Jahren kennen gelernt. Von da an gingen sie, bis zu ihrem Tode, als unzertrennliches Freundschaftsgespann durchs Leben.

Julius Elster ist am 24. Dezember 1854 in Blankenburg a. H. geboren worden. Geitel erblickte am 16. Juli 1855 in Braunschweig das Licht der Welt. Die nunmehr 150. Geburtstage sollen Anlass sein, an die beiden nicht nur für die Region Braunschweig bedeutenden Wissenschaftler zu erinnern.

20

## Veranstaltungen der BWG

- 14.30 Uhr     *Begrüßung und Einführung*  
 Prof. Dr. Dr.h.c. Joachim Klein, BWG  
 Prof. Dr. Andreas Hangleiter, TU Braunschweig, Dekan der  
 Fakultät für Physik und Geowissenschaften
- 15.00 Uhr     *Die Achse Wolfenbüttel –Braunschweig, Radioaktivitätsforschung  
 1896-1914 in der akademischen Provinz*  
 Dr. Beate Ceranski, Universität Stuttgart, Abteilung für Ge-  
 schichte der Naturwissenschaften und Technik
- 16.30 Uhr     *Von der Entdeckung zur Überwachung der Umweltradioaktivität*  
 Dr. Dirk Arnold, Physikalisch-Technische Bundesanstalt
- Experimente zur natürlichen Radioaktivität nach Elster und  
 Geitel –mit Vorführungen*  
 Prof. Dr. Henning v. Philipsborn, Universität Regensburg, Radio-  
 metrisches Seminar
- 18.30 Uhr     *Schlussworte*

\*\*\*

10.30 Uhr     EXKURSION in Wolfenbüttel

Interessierte können sich bereits am Vormittag einem von Rudolf Fricke geführ-  
 ten Spaziergang zu den Wirkungsstätten von Elster und Geitel in Wolfenbüttel  
 anschließen.

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft  
 Technische Universität Braunschweig  
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Ort: Aula der Technischen Universität Braunschweig, Pockelsstraße 11

## Weitere Veranstaltungen 2005

**23.02.2005**    **ERÖFFNUNG DER AUSSTELLUNG**

**Bildungsreform und Eliteförderung –  
Carl Friedrich Gauß und Braunschweig**

Im Rahmen dieser Ausstellung ist ein Kabinett dem Thema  
„**Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft  
und Gaußmedaille**“  
**Geschichte –Struktur –Ziele,**  
gewidmet.

*Veranstalter:*    Braunschweigisches Landesmuseum  
                          Bibliothek der TU Braunschweig  
                          Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

*Ort:*                Braunschweigisches Landesmuseum

**01.06.2005**    **DISKUSSIONSFORUM**

**Die Welt der Zahlen, damals und heute**

Einführung:

Hans-Joachim Behr, TU Braunschweig:  
*Deus geometra. Gott spricht in Mathematik*

Heiko Harborth, TU Braunschweig:  
*Carl Friedrich Gauß und die Welt der Zahlen*

*Ort:*                Haus der BWG, Fallersleber-Tor-Wall 16,  
                          38100 Braunschweig

**06.12.2005 VERLEIHUNG BRAUNSCHWEIGER BÜRGERPREIS  
FÜR HERAUSRAGENDE STUDENTISCHE LEISTUNGEN**

*Begrüßung:*

Dr. h.c. Gerd Biegel, M.A., Ltd. Museumsdirektor des Braunschweigerischen Landesmuseums

*Preisverleihung und Vorstellung der Preisträger:*

Thomas Heinisch, Vorstandsvorsitzender der Stiftung Braunschweiger Bürgerpreis

Prof. Dr. Jürgen Hesselbach, Präsident der TU Braunschweig

*Gratulation:*

Prof. Dr. Joachim Klein, Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

*Festvortrag:*

Prof. Dr. Jochen Zschau, GeoForschungsZentrum Potsdam:

„Tsunami: Warum eine Gefahr zur Katastrophe wird“

*Veranstalter:* Stiftung Braunschweiger Bürgerpreis für herausragende studentische Leistungen  
Braunschweigisches Landesmuseum  
Technische Universität Braunschweig  
Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

*Ort:* Braunschweigisches Landesmuseum

## PLENARVERSAMMLUNGEN

### **Die große Kuppel von Florenz Ein Meisterstück des 15. Jahrhunderts\***

UDO PEIL

Institut für Stahlbau, TU-Braunschweig  
Beethovenstraße 51, D-38106 Braunschweig

Die große Kuppel von St. Maria del Fiore beherrscht mit ihrer klaren, himmelstürmenden Form das Stadtbild von Florenz, gleich aus welcher Richtung man sich der Stadt nähert (Bild 1). Dieser auch heute noch gültige Eindruck war wohl die Vision beim Entwurf einer Kuppel, von der zunächst keiner der Beteiligten wusste, wie und ob dieser Entwurf überhaupt realisiert werden könnte.



Bild 1: Stadtbild Florenz von der Piazzale Michelangelo

Im Jahre 1294 wird in Florenz nach dem ersten Entwurf und unter der Leitung von Arnolfo di Cambio mit dem Bau des neuen Doms begonnen, nachdem die vorherige romanische Domkirche St. Reparata der Stadt viel zu klein geworden ist. Arnolfo di Cambio ist Caputmagister, also der technische und gestalterische

---

\* Vortrag gehalten am 15.01.2005 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

Kopf der opera del duomo, der Dombauhütte. Er baut parallel in Florenz an St. Croce und auch am Palazzo Vecchio. Für den Bau des neuen Doms wird St. Reparata und fast ein ganzes Viertel um den späteren Dom abgerissen, Straßen werden tiefer gelegt, um dem Dom ein würdiges und erhabenes Erscheinungsbild zu sichern.

Die Verantwortung für den Bau ist in der Hand der Handwerkszünfte der Stadt. Im Jahre 1331 übernimmt die wohlhabende Zunft der Wollhändler (Arte della Lana) die Leitung der Opera del Duomo. Diese bestellt im Jahre 1334 den Maler Giotto zum Caputmagister oder italienisch capomaestro. Giotto führt den Bau des eigentlichen Doms nicht weiter, wohl auch wegen der zwischenzeitlichen Diskussionen um die zukünftige Gestalt, sondern beginnt mit dem Bau des Campanile, der nach seinen Entwürfen eine Höhe von 122m haben sollte. Von dem heute 84m hohen Campanile wird aber bis zu seinem Tode nur das unterste Geschoss vollendet.

Im Jahre 1346 bricht ein Großteil der Finanzierung des Dombaues weg, da die Finanziere, die Bankhäuser Bardi und Peruzzi infolge der Zahlungsunfähigkeit des englischen Königshauses, bedingt durch den hundertjährigen Krieg zwischen England und Frankreich, bankrott gehen. Ein Jahr später kommt es noch schlimmer, Florenz wird von der Pest getroffen. In nur zwölf Monaten sterben vier Fünftel der Einwohner. Der Dombau geht in dieser Zeit so gut wie nicht weiter, erst 1355, also 59 Jahre nach der Grundsteinlegung sind die Wände und die Fassade des Langhauses fertiggestellt. Nach weiteren elf Jahren, im Jahre 1366, ist auch das Langhaus überdacht.

Die Planung der Kuppel tritt nun in eine entscheidende Phase. Bisher ist immer noch völlig unklar, wie die eigentliche Kuppel aussehen oder auch gebaut werden soll. Die Opera del Duomo beauftragt deshalb den capomaestro Giovanni di Lapo Ghini, ein Modell der geplanten Kuppel einschließlich Langschiff zu bauen. Lapo Ghinis Modell ist dem Geschmack seiner Zeit verhaftet, der italienischen Gotik mit dünnen Mauern, Strebepfeilern und Bögen zum Abstützen der Kuppel. Dieser Entwurf stößt jedoch auf vielfache Kritik, er ist den Florentinern zu sehr mit dem Geschmack der traditionellen Feinde von Florenz verbunden, den Mailändern, den Deutschen und Franzosen, den Goten eben, die halb Europa mit ihrem Baustil überzogen hatten. Die Opera del Duomo gibt deshalb bei Neri di Fioravanti, dem Erbauer des Ponte Vecchio über den Arno, ein zweites Modell in Auftrag. Der Entwurf von Neri di Fioravanti enthält keine gotischen Elemente mehr, gleichzeitig wird die Kuppel noch einmal deutlich vergrößert.

Jedes Gewölbe oder jede Kuppel erzeugt am unteren Rand horizontale Schubkräfte, die vom Unterbau aufgenommen werden müssen, sonst ist die Kuppel nicht tragfähig. Bild 2 macht dies deutlich. Die radial nach außen wirkende Horizontalkraft der „Menschenkuppel“ wird durch die Reibung zwischen Fuß





Bild 2: Kuppelsimulation

und Boden in den Erdboden übertragen. Wenn die Turner Rollschuhe trügen, die Horizontalkraft also nicht aufgenommen werden könnte, würde die Konstruktion versagen.

Neri di Fioravanti geht von der Überlegung aus, die horizontalen Kräfte mit einem Ring aus Eisen oder Holz aufzunehmen (Bild 3).

Bisher war noch nie eine Kuppel solchen Ausmaßes errichtet worden. Es war völlig unklar, ob die Lösung überhaupt funktionierte. Berechnungen oder ähnliches, wie es heute üblich ist, gab es nicht. Dennoch entschied sich die Opera del Duomo nach einem öffentlichen Referendum für diesen Entwurf. Das war

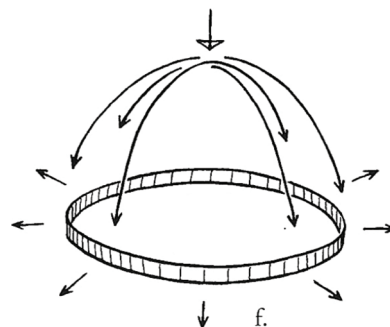


Bild 3: Ring zur Aufnahme der Kuppelschubkräfte [8]

ein mutiger Entschluss. Die Frage, die sich hier stellt, ist: Stand die Größe im angemessenen Verhältnis zum Risiko, oder anders gefragt, was mag das Motiv für den Mut gewesen sein?

Die Antwort liegt wohl in der zahlenmäßigen Abstimmung des Neri-Entwurfs, der vollständig der mittelalterlichen Zahlenmystik entsprach. Zahlen waren für die Menschen des Mittelalters etwas Wesenhaftes, sie hatten eine innere Kraft. Die Zahl 3 gehörte z. B. zur Trinität, die 4 zu den 4 Erzengeln, den 4 Elementen, den 4 Himmelsrichtungen.  $3 \times 4$  ergibt 12, 12 zum Quadrat ist 144. Die Mauern der biblischen Stadt Jerusalem waren 144 Ellen hoch (Apokalypse des Johannes 21,17). Sich mit den richtigen Zahlen zu verbünden, hieß, sich richtig in die Schöpfung, in den Kosmos einzufügen.

Die mittelalterlichen Baumeister wollten (oder konnten) nur mit ganzen Zahlen rechnen (vorzugsweise mit geraden Zahlen). Neri's Entwurf war weitgehend nur mit geraden Zahlen realisiert: der Durchmesser beträgt 78 Ellen, die Kuppelbreite 72 Ellen, die äußere Segmentlänge beträgt 30 Ellen, die Kuppelhöhe beträgt wie die Länge des Langschiffes 144 Ellen (Bild 4).

Der Entwurf wurde begeistert aufgenommen, das Neri-Modell wurde zu einem Gegenstand allgemeiner Verehrung. Jedes Jahr mussten die capomaestri schwören, diesen Entwurf exakt zu verwirklichen. Neri hatte die Kuppel doppel-schalig, aber nicht als Halbkugel ausgebildet, sondern steiler, himmelstürmender (Bild 5). Gleichzeitig verringern sich dadurch auch die horizontalen Kuppelschubkräfte.

Völlig ungeklärt war indessen immer noch die Frage, wie die Kuppel gebaut werden sollte. Eine Einrüstung schied bei einer Höhe von fast 100m aus, man hätte ca. 700 große und dicke Baumstämme benötigt, dies war nicht machbar. Es gab eine Reihe kurioser Vorschläge. Einer bestand darin, den Innenraum mit Sand zu füllen, so dass die Kuppel oben auf dem Sandbett gebaut werden konn-

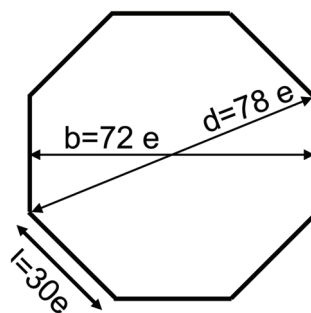


Bild 4: Kuppelmaße

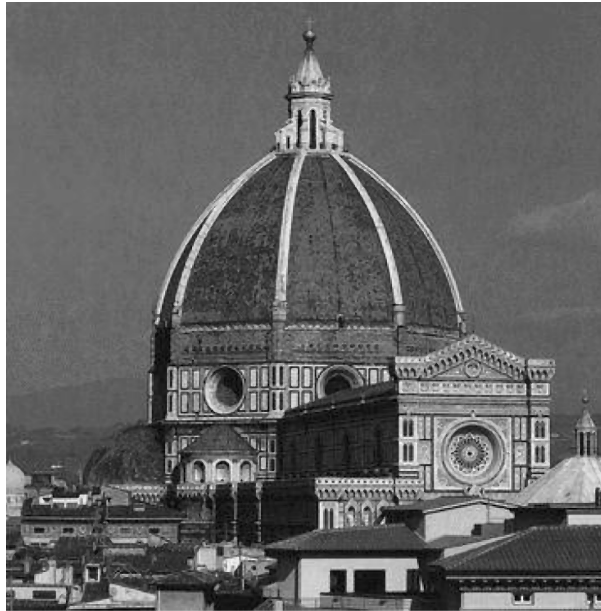


Bild 5: Kuppel

te. Der Sand sollte mit Silbermünzen durchsetzt sein, um die Florentiner Bürger zu stimulieren, den Sand wieder heraus zu holen.

In dieser Situation entschied sich die Opera del Duomo dazu, einen Wettbewerb um den Bau der Kuppel auszuschreiben. Der Gewinner sollte 200 Goldflorinen erhalten, das war ein mehrfaches Jahresgehalt eines gut verdienenden Handwerkers. Gewinner des Wettbewerbs war der vierundzwanzigjährige Filippo Brunelleschi, ein gelernter Goldschmied, der die Opera del Duomo u.a. mit einer trickreichen perspektivischen Ansicht des Baus überzeugt hatte. Brunelleschi war ein genialer Mann, sehr beredsam, er sprach Latein wie seine Muttersprache. Seine Leidenschaft war die Geometrie, die Mathematik und alles Mechanische. Er gilt als der Erfinder der Zentralperspektive. Das Studium der Baukunst begann er autodidaktisch anlässlich einer Studienreise nach Rom, wo er alle großen Bauwerke analysierte.

Der Entwurf der Kuppel von Brunelleschi hielt sich streng an die Vorgaben von Neri di Fioravanti. Die zweischalige Kuppel bestand aus Mauerwerk: der eigentlich tragenden inneren und der mehr dem Witterungsschutz dienenden äußeren Kuppel. Zwischen beiden befindet sich ein Aufstieg bis hoch zur Laterne. Die acht Ecken des Oktogons werden durch acht Hauptrippen gebildet, die

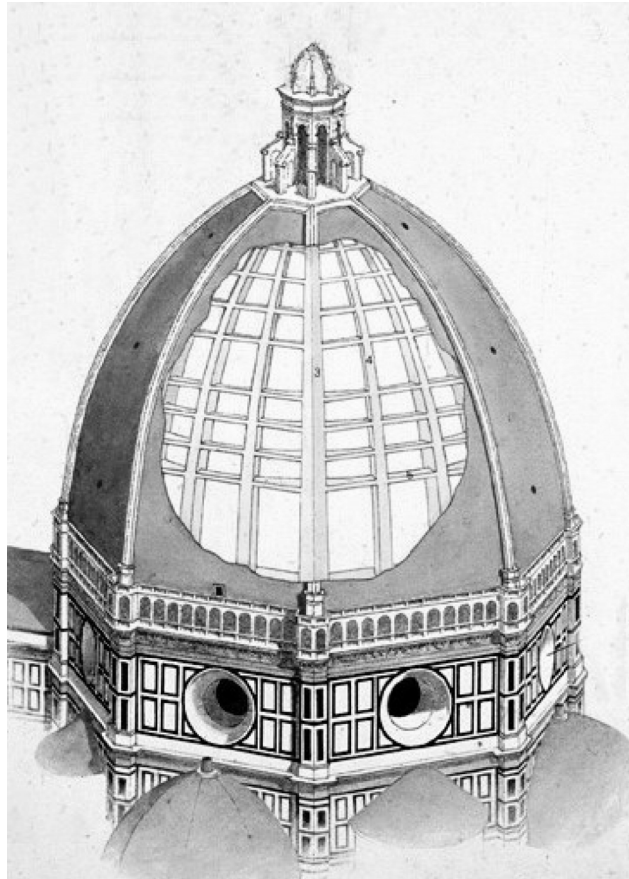


Bild 6: Kuppel mit teilweise geöffneter äußerer Dachschale

jeweils auf einem Hauptpfeiler stehen, siehe Bild 6. Sechzehn Nebenrippen stehen auf dem sog. Tambour (wegen der Trommelform), der die Kräfte in die Hauptpfeiler weiterleitet. Der Tambour enthält große kreisförmige Fenster zur Belichtung. In der Kuppelspitze ist eine Laterne angeordnet, die Luft und Lichtzufuhr sicherstellt. Unterhalb des Tambours sind Seitenkapellen angeordnet, die den radialen Horizontalschub der Kuppel mit aufnehmen sollen. Bild 7 zeigt eine Entwurfszeichnung Brunelleschis, die als Plakat im Museo del Opera del Duomo – dessen Besuch ein Muss ist – direkt hinter dem Dom erhältlich ist.

Da ein Bau der Kuppel auf einem Gerüst, wie es bisher immer gemacht wurde, nicht möglich ist, entschließt sich Brunelleschi, die Kuppel freitragend vom

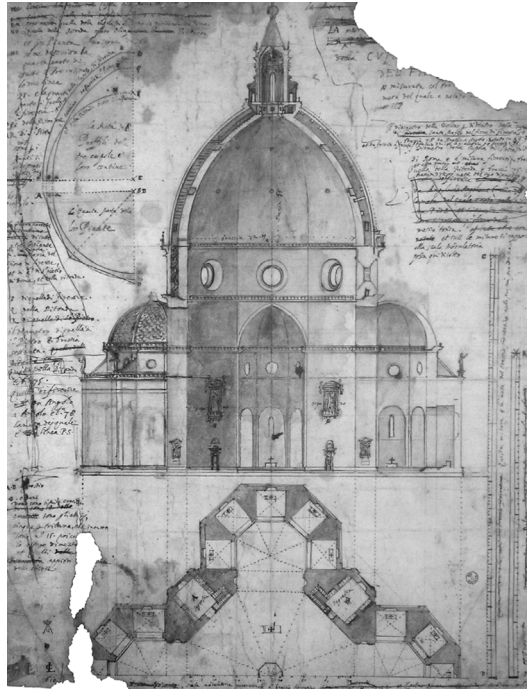


Bild 7: Entwurfszeichnung von Brunelleschi

Tambour her Schicht für Schicht aufzubauen. Dies setzt freilich einige Überlegungen voraus. Zum Verständnis des Tragverhaltens ist es nützlich, wenn man zwischen dem Tragverhalten während des Baus und dem endgültigen Tragverhalten im Endzustand mit Laterne unterscheidet.

Während des Baus ist das Tragverhalten durch einen räumlichen Kraftzustand gekennzeichnet, siehe Bild 8, Bild 2 macht das Tragverhalten zusätzlich deutlich, die Druckkräfte in Bild 8 sind die Druckkräfte in den Armen der Gruppe. Im Endzustand mit aufgesetzter Laterne dominiert das Verhalten einer Rippenkuppel, bei der die Last über vier sich kreuzende Bögen zu den acht Pfeilern abgetragen wird, vgl. Bild 9.

Durch die zunehmende Neigung der Kuppel zur Laterne hin wird das Mauerwerk der Kuppel durch sein Eigengewicht zunehmend auch senkrecht zur Mauerwerksebene beansprucht, bei sehr flacher Neigung würde das Mauerwerk möglicherweise nach innen einbrechen. Ideal zum Abtragen der senkrecht zum Mauerwerk wirkenden Kräfte wäre eine kreisrunde Kuppel. Kreisrunde Konstruktionen sind perfekt geeignet, radiale Druckkräfte abzutragen vgl. das Hüh-

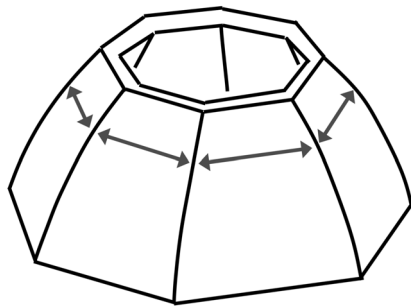


Bild 8. Tragverhalten Bauzustand

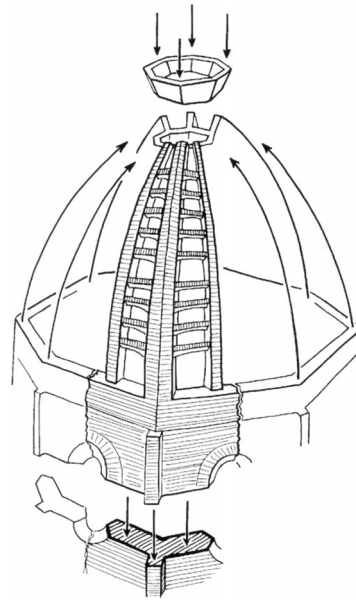


Bild 9: Tragverhalten Endzustand [2]

nerlei, das während des Legevorgangs sehr großen Druckkräften ausgesetzt ist. Ähnlich ist es mit Rohren im Erdreich, die allseits gedrückt werden.

Hier setzt nun die geniale Idee Brunelleschis an, mit dem der Baumeister seiner Zeit weit voraus war. Wenn es gelingt, das Oktogon so zu gestalten, dass sich im Mauerwerk aufeinanderliegende Ringe (mit nach oben abnehmendem Durchmesser) ausbilden können, trägt jeder einzelne Ring seine radialen Druckkräfte in sich ab, es tritt nur eine Druckbeanspruchung im Mauerwerk auf, das Einbrechen des Mauerwerks wird verhindert. Die Mauerwerksbereiche, die außerhalb des Rundbogens liegen, stellen bei dieser Betrachtung totes Material dar, das nicht mitträgt.

Man erkennt in Bild 10 oben, dass die innere Ringseite am Knick jeweils eng am Innenrand verläuft, wogegen die äußere Ringseite die Seitenmitte berührt. Die Ringmitte liegt also am Knick (bei Punkt A) dichter an der Innenkante als in Seitenmitte (bei Punkt B). Da die Kuppel schräg ansteigend gemauert ist, liegt Punkt B höher als Punkt A, vgl. Bild 10 unten. Bei paralleler Ausführung des Mauerwerks mit gerader oberer Kante (wie es üblich ist) würde unser gedachter Ring also girlandenartig von den Kanten (Punkt A) zu den Seitenmitten (Punkt B) ansteigen (Bild 11), dies ist aber kein Kreisring mehr, ein solcher geknickter Ring würde bei äußeren Druckkräften „zusammengefaltet“ werden. Um den Ring

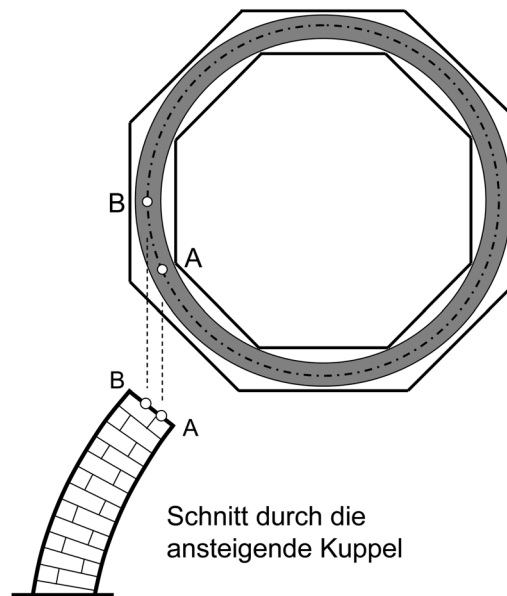


Bild 10: Schnitt durch die ansteigende Kuppel

eben zu halten, muss also das Mauerwerk zwischen den Kanten um den Höhenunterschied zwischen Punkt B und Punkt A abgesenkt werden. Die entstehende Girlandenkurve entspricht übrigens auch der Kurve, die ein Bleistift beim Anspitzen am Übergang vom sechseckigen Schaft auf den angespitzten Kegel zeigt, auch dort wird der (sechseckige) Bleistift in die Ringform des Spitzers gezwungen.

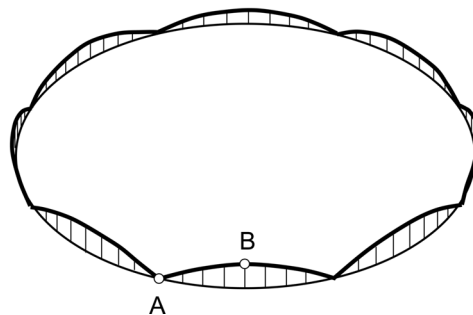


Bild 11: Veränderung des Kreisrings bei paralleler Mauerung

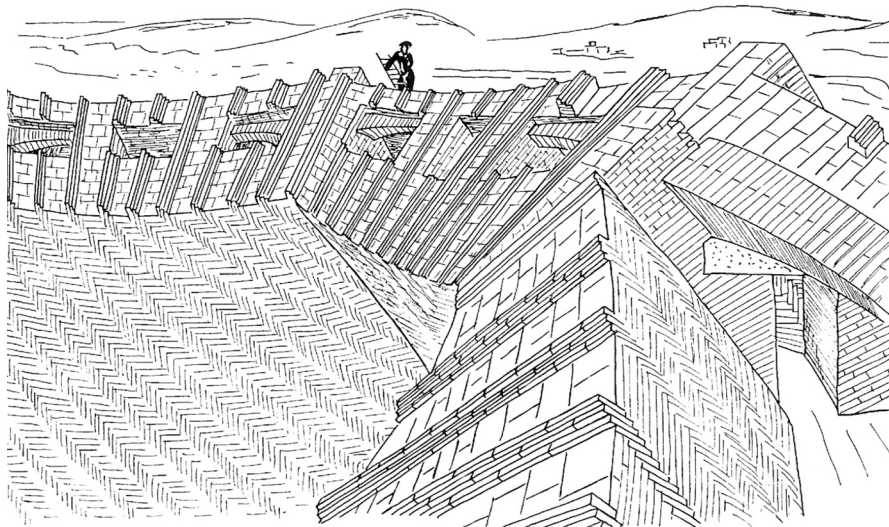


Bild 12: Kuppel im Bauzustand [2]

Um den genannten, günstigen Kreisringtrageffekt auch bei den äußeren horizontalen Rippen zu ermöglichen, wurden von Brunelleschi Ausrundungen der horizontalen Rippen im Bereich der Kanten vorgesehen, so dass sich auch dort ein Ring einstellen kann. In Bild 12 ist dies rechts erkennbar.

Bild 12 zeigt eine zeichnerische Rekonstruktion der Kuppel in einem Bauzustand. Man erkennt, dass Brunelleschi das Mauerwerk tatsächlich so gestaltet hat, dass die Bereiche zwischen den Kanten des Oktogons girlandenartig durchhängen.

Ein weiteres Problem trat beim Bau der Kuppel dadurch auf, dass bei flacher werdender Neigung die Ziegellagen im Mörtelbett abrutschen können. Um dies zu vermeiden, verwendete Brunelleschi eine spezielle Form des Mauerwerks, ein Fischgrätmuster. Einige Steine wurden vertikal gestellt, die Nachbarsteine wieder horizontal gelegt, vgl. Bild 13.

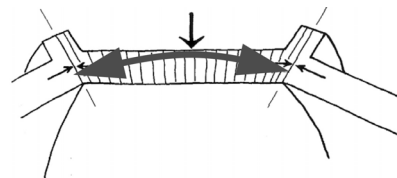
Die horizontal liegenden Ziegel können sich beim Mauern gegen die bereits vertikal stehenden verkeilen, so dass sie nicht herunterrutschen. Gleichzeitig wird durch die Art des Mauerwerkes die Bildung eines Druckgewölbes in ihm ermöglicht, so dass keine gefährliche Zugbelastung in den Mörtelfugen auftritt, vgl. Bild 14.

Durch die Besonderheiten des Entwurfs sind die horizontalen Kuppelschubkräfte klein gehalten worden. Dennoch sind umlaufende Zugringe erforderlich, vgl.





Bild 13: Frischgrät-Mauerwerk



Keilförmige Anordnung trägt !

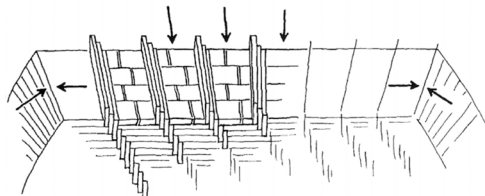


Bild 14: Günstige Mauerwerksform [2]

Bild 3. Brunelleschi sieht hierfür umlaufende oktagonale Natursteinbänder vor, die mit Eisenhaken verbunden werden. Zusätzlich werden Holzringe eingebaut.

Für den Bau der Kuppel wurden von Brunelleschi große Kräne entworfen und gebaut. Angeblich wurde jede einzelne Ziegel von ihm persönlich begutachtet. Pro Woche wurde eine Ziegellage gemauert, die dann ausreichende Festigkeit zur Aufnahme der nächsten Lage hatte. Über 300 Personen arbeiteten am Dom von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang. Küchen, Toiletten etc. waren oben vorhanden. Dennoch war das Leben hart, gezahlt wurde nur, wenn gearbeitet wurde. Der Lohn war niedrig, wer sich verletzte, musste damit selbst fertig werden. Die Zahl der Unfälle war allerdings sehr gering, dank der Vorsichtsmaßnahmen Brunelleschis waren nur drei Todesopfer zu beklagen.

Am 30. August 1435 wurde St. Maria del Fiore durch Papst Eugen eingesegnet, der vor dem römischen Pöbel, der ihn wegen seiner kontinuierlichen Kriege attackierte, nach Florenz geflohen war. In Begleitung von 7 Kardinälen, 37 Bischöfen, 9 Mitgliedern der Florentiner Regierung sowie von Cosimo de Medici begab sich Papst Eugen von seiner Residenz in St. Maria Novella (gegenüber dem heutigen Bahnhof) zum Dom. Für die letzten 300 Meter hatte man ein Holzgerüst gebaut, um den Papst dem Pöbel zu entrücken. Vorher hatte man bei solchen Gelegenheiten Münzen zur Ablenkung unter das Volk geworfen. Mehr als hunderttausend Menschen nahmen begeistert an der Einsegnung teil.

Diese Einsegnung war der Beginn einer neuen Zeit: das Mittelalter war vorüber. Brunelleschi starb am Karfreitag, dem 15. April 1451. Er wurde von den Florentinern im Dom, in der Cripta di St. Reparata beerdigt, eine Ehre, die nicht einmal Michelangelo zuteil wurde. Brunelleschis Werk war grandios, es ist vielleicht mit dem von Kolumbus vergleichbar, der ebenfalls – nur gestützt auf sein profundes Wissen und seinen Mut – Grenzen überschritt, die zuvor niemand auch nur berührt hatte.

### Literatur

- [1] ROSS, K.: Das Wunder von Florenz. Architektur und Intrige: Wie die schönste Kuppe der Welt entstand. A. Knaus-Verlag, München, 2003
- [2] KRÄMER, T.: Die große Kuppel von Florenz. Verlag Freies Geistesleben. Stuttgart, 2001.
- [3] GALLUZZI, P.: Renaissance Engineers. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci. Istituto e Museo di Storia della Scienza, Florence. 1st Edition, 1996.
- [4] SETTLE, T.B.: Brunelleschi's horizontal arches and related devices. Annali dell'Istituto e Museo di storia della scienza di Firenze, 1978, S. 65-80.

## Schlußwort zur Neujahrssitzung der BWG am 15. Januar 2005

CLAUS-ARTUR SCHEIER

Vielen Dank, *lieber Herr Peil*, für Ihren sachkundig-begeisternden Vortrag, der uns einen bedeutenden Ort in einer bedeutenden Zeit vergegenwärtigte, bedeutend im Denken, im Schauen und im Schaffen. Es war, *meine sehr verehrten Damen und Herren*, eine große Zeit, ein Augenblick, *kairós*, unsrer Geschichte, der wie kein anderer die schöne Einheit von unendlicher Tiefe und mathematischer Klarheit zur vollkommenen Darstellung gebracht hat. Der kunstgeschichtliche Name dieser Einheit heißt Zentralperspektive, dessen Entdecker Filippo Brunelleschi wir heute gefeiert haben. Er „entdeckte“ sie aber nicht etwa als die wahre Art zu sehen, die in unserm natürlichen Sehen immer schon verborgen wirksam gewesen wäre, sondern als das Prinzip eines Gedankens-der-Welt, der neuzeitlichen Welt, die im ganzen und bis ins Innerste ihrer logischen Subjekt-Objekt-Verhältnisse hinein zentralperspektivisch bestimmt war (demgegenüber ist die Moderne nicht deperspektivierend, aber dezentralisierend). Daß dies ein geschichtliches Welt-Verhältnis ist, macht schon Dantes „Göttliche Komödie“ deutlich, aber philosophisch-systematisch wird die Zentralperspektive – wie, von ihr unabtrennbar, der unendliche Raum und seine infinitesimale Mathematizität – Ereignis erstmals im Denken des Nikolaus von Kues, der genau ein Vierteljahrhundert jünger war als Brunelleschi. Und noch einmal fast ein halbes Jahrhundert jünger, 1449 geboren, war der Florentiner Bürger, in dessen tatkräftigem Geist sich alle Strahlen dieses geistig leuchtenden Jahrhunderts versammelten, und der, erst dreiundvierzig Jahre alt, im Jahr der Entdeckung Amerikas, 1492 starb: Lorenzo de' Medici, der Prachtige, *il Magnifico*. Er war ein Dichter von Rang, der jene Einheit als das In-Eins von philosophischer Tiefe und der Klarheit des gelebten Tages ins Wort zu versammeln wußte, das heute noch so frisch ist wie damals. Erlauben Sie mir darum, Ihnen zum Abschluß unsrer diesjährigen Neujahrssitzung den Anfang eines seiner Gedichte, des „Triumphs von Bacchus und Ariadne“ anklingen zu lassen:

Quanto è bella giovinezza	Jugendzeit, Zeit ohne Sorgen,
Che si fugge tuttavia!	Zeit, die schnell flieht, allzu schnelle!
Chi vuol esser lieto sia,	Willst du froh sein, sei zur Stelle,
Di doman non ci è certezza.	Denn was wissen wir von morgen.

Und mit dieser Erinnerung darf ich Sie „zur Stelle“ einladen, in die schönen Räume unsrer BWG.



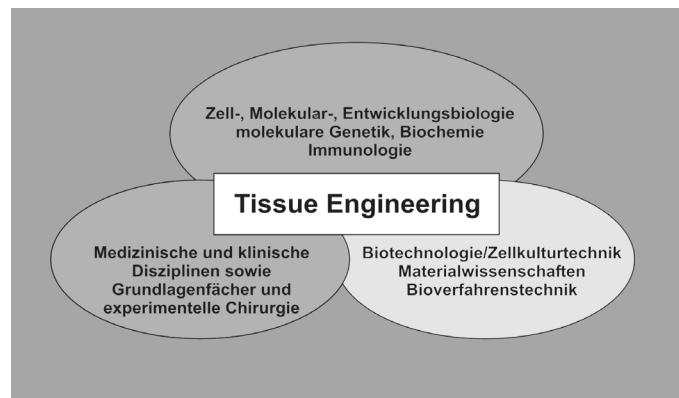
## Tissue Engineering Möglichkeiten und Perspektiven\*

THOMAS SCHEPER & CORNELIA KASPER

Institut für Technische Chemie, Universität Hannover  
Callinstr. 3, D-30167 Hannover

### Einleitung

**Tissue Engineering** ist ein vergleichsweise “junges”, stark inter- und transdisziplinäres Wissenschaftsgebiet. Große Entwicklungsschritte sind innerhalb der letzten 15 bis 20 Jahre auf diesem Gebiet vollbracht worden. Zur Rekonstruktion von Ersatzgeweben und -organen mit den Methoden des Tissue Engineerings ist ein Zusammenwirken verschiedener Disziplinen aus Ingenieur-, Material- und Lebenswissenschaften (Biologie, Chemie, Medizin) erforderlich.



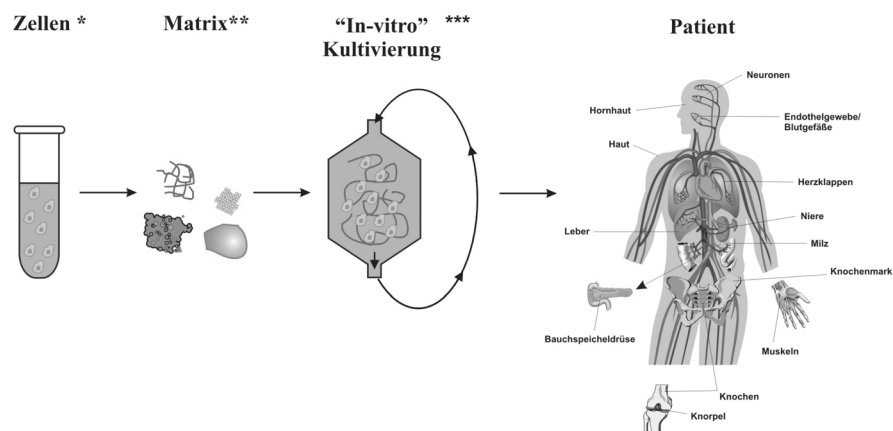
Tissue Engineering ist ein interdisziplinäres Forschungsgebiet.

Das Prinzip des Tissue Engineering beruht darauf, dem Patienten Körperzellen zu entnehmen, diese außerhalb des Körpers (extracorporal) zu züchten und nach erfolgter Vermehrung diese dem Patienten zu reimplantieren. Für die erfolgreiche Vermehrung der meisten Gewebezellen ist der Einsatz einer Matrix nötig.

---

\* Vortrag gehalten am 11.02.2005 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

Im Idealfall sollten die Zellen vom Patienten selbst stammen (autologe Zellen), denn so wird eine Abstoßungsreaktion des Körpers nach Reimplantation vermieden. Gewebedefekte können so mit gezüchteten körpereigenen Zellen repariert bzw. gefüllt werden ohne langfristig auf künstliche Materialien oder Transplantate angewiesen zu sein. Weitere Vorteile sind ein Organersatz zu jedem Zeitpunkt und dadurch planbare Operationen sowie die Transplantation von nicht abstoßungsgefährdetem körpereigenen Gewebe.



- \* Gewebezellen, Stammzellen oder embryonale Stammzellen (autolog oder allogene)
- \*\* Natürlich, synthetisch oder xenogen (Fasern, Hydrogel, Kapseln)
- \*\*\* statisch, unter Rühren oder dynamische Fließbedingungen

Prinzip des Tissue Engineering; Zellen werden unter Zuhilfenahme von Matrixstrukturen im Labor unter geeigneten Bedingungen künstlich gezüchtet

### Methoden und Strategien im Tissue Engineering

Die Methodik, die beim Tissue Engineering verfolgt wird, kann in drei Ansätze untergliedert werden:

1. *in-vitro* Kultivierung autologer/allogener Zellen auf organischen, synthetischen oder natürlichen Matrices
2. *in-vitro* Kultivierung autologer/allogener Zellen auf xenogenen Matrices
3. *in-vitro* Kultivierung von embryonalen Stammzellen

Bei allen drei Ansätzen werden die Zellen auf verschiedenen Trägermaterialien gezüchtet. Dies ist notwendig, da Gewebezellen eine Matrixstruktur zum Wachsen benötigen. Im Organismus übernimmt die Rolle dieser natürlichen Träger-

struktur die sogenannte extrazelluläre Matrix (ECM), eine von den Zellen selbst produziertes komplexes Netzwerk verschiedener Biomoleküle (Oligo/Polysaccharide, Proteine u.a.). Diese ECM sorgt dafür, dass die Zellen sich korrekt entwickeln. Bei der künstlichen Erzeugung von Geweben werden biokompatible Materialien eingesetzt, die natürlichen (auch tierischen) Ursprungs oder synthetisch erzeugt sein können. Zu der ersten Gruppen zählen vor allem Chitosane, Hydrogele (z.B. Alginate) und andere Polysaccharide, Polymilchzucker (Polylactide) und mineralische Träger wie Calciumphosphate. Bei der zweiten Gruppe der xenogenen Trägerstrukturen finden vor allem „Material“ aus dem Schwein und Rind Anwendung. Hierzu werden die Zellen des Spendergewebes entfernt, so dass nur noch das Matrixgerüst zurückbleibt. Dieses wird dann mit Zellen besiedelt. Wie bei der Xenotransplantation ist aufgrund der potentiellen Gefahr der Übertragung von Infektionserregern (vor allem so genannte endogene Viren) dieser Ansatz jedoch immer wieder in der Diskussion.

Als „Zellquellen“ können gewebespezifische Zellen (primäre Zellen) oder auch Stammzellen eingesetzt werden. Bei den gewebespezifischen Zellen stammen diese idealerweise vom Patienten selbst, sog. autologe (adulte) Zellen. Hierdurch können Komplikationen durch Abstoßungsreaktionen umgangen werden. Bei Anwendung von Spenderzellen (allogen) muss nach erfolgter Transplantation des künstlich generierten Gewebes die Abstoßungsgefahr durch medikamentöse Behandlung unterdrückt werden (Immunsuppression).

Abhängig vom benötigten Zielgewebe, werden heute zwei Strategien des Tissue Engineering verfolgt:

- Offene Systeme
- abgeschlossene Systeme

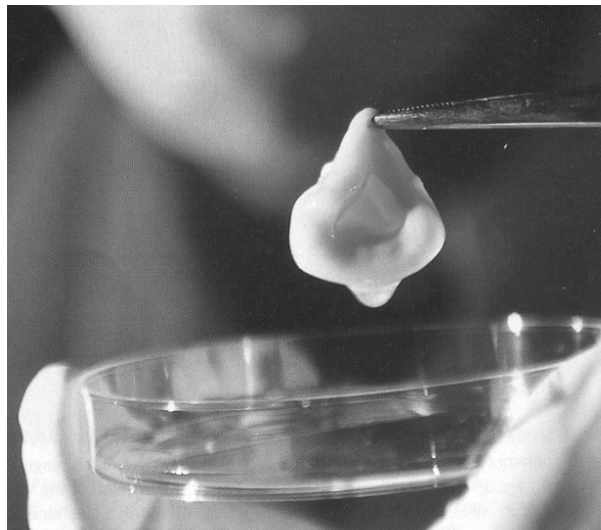
Für diese Strategien soll nun exemplarisch ein Beispiel gegeben werden. Hierbei beschränken wir uns auf Anwendungen, bei denen autologe Zellen verwendet werden.

Unter einem offenen System versteht man die Züchtung von Zellen auf einer Matrix oder einem bio-abbaubaren Gerüst (natürlich oder synthetisch). Die meisten Entwicklungen basieren auf diesem Ansatz. Eine Anwendung hierfür wäre der Hautersatz (Infokasten 4) für z.B. schwerstverbannte Opfer. Haut als Gewebe ist vergleichsweise „einfach“ zu züchten und gehört somit auch zu den ersten Gewebetypen, die künstlich hergestellt und klinisch eingesetzt wurden. Allerdings besteht bis heute das Problem, dass die durch Tissue Engineering gewonnene Haut die ursprünglichen Funktionen wie Schweißabsonderung oder auch natürlichen Haarwuchs noch nicht erreicht werden können.

Ein weiteres Beispiel ist die autologe Knorpelzelltransplantation (ACT). Diese Form der Therapie kommt vor allem bei Knorpelschäden im Kniegelenk und an den Bandscheiben zum Einsatz. Streng genommen gehört diese Anwendung

eher zu den Zelltherapien, denn die Zellen werden bisher ohne Stützgerüst gezüchtet und nach Vermehrung dem Patienten implantiert. Allerdings wird derzeit auch daran gearbeitet, diese Knorpelzellen zunächst auf einem geeigneten Material (Kollagen) zu vermehren, das erhaltene Konstrukt besitzt eine größere mechanische Stabilität und wird für den Einsatz bei Meniskusschäden untersucht.

Ein weiteres interessantes und wichtiges Beispiel ist die Züchtung von Herzklappenzellen auf einer Klappenmatrix aus dem Rind oder Schaf (xenogene Matrix).



Künstliche Herzklappe: Die Trägerstruktur wurde aus dem Schaf isoliert und nach Entfernen sämtlicher Zellen mit menschlichen Zellen besiedelt  
(Mit freundlicher Genehmigung von Herrn Prof. Augustinus Bader, Universität Leipzig, Institut für Zelltechniken und angewandte Stammzellbiologie)

Künstliche Herzklappen werden vielfach bei Kindern mit angeborenen Herzklappenfehlern benötigt. Bisher eingesetzte künstliche Klappen aus Metall oder anderen starren Materialien haben zwar die nötige Stabilität, wachsen aber nicht mit dem Patienten, was gerade bei Kindern eine wesentliche Anforderung ist. Durch den Einsatz von mitwachsenden Klappen könnten Kindern schwierige und risikoreiche (und auch kostenintensive) Operationen erspart werden.

Ein Beispiel für ein abgeschlossenes System ist z.B. der Einsatz der so genannten "künstlichen Leber". Hierbei werden Leberzellen (z.B. aus einer Schweine-



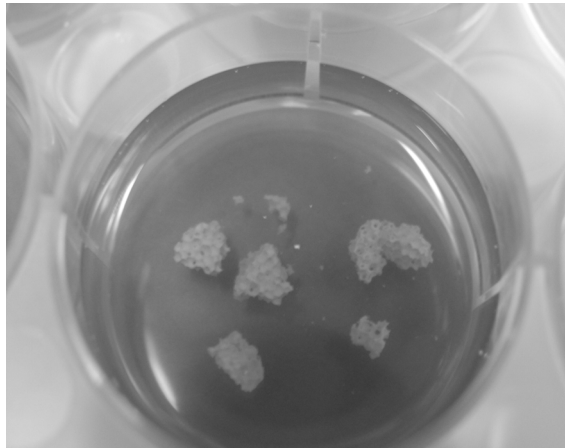
leber oder auch humane Leberzellen) in einem Kultursystem extrakorporal gezüchtet und das Patientenblut ähnlich wie bei der Dialyse ("künstliche Niere", bei der Dialyse werden allerdings keine Zellen eingesetzt) durch dieses System geleitet werden bevor es zurück in den Patienten verbracht wird. So kann das Blut beim Durchfließen des Systems von Schadstoffen befreit werden. Heute wird diese Art Lebersystem schon klinisch eingesetzt um z.B. Patienten am Leben zu erhalten bis eine Spenderleber vorhanden ist oder so lange bis eine geschädigte bzw. verletzte Leber sich regeneriert hat. Dies ist nur möglich, da die Leber ein großes Potenzial zur Selbstregeneration hat. Die Leberzellen allerdings nur eine sehr begrenzte Leistungsfähigkeit innerhalb dieses Systems. Es wird angenommen, dass die Zellen unter diesen Bedingungen ihre spezielle Differenzierung als Leberzelle mit ihren Funktionalitäten verliert. Darüber hinaus wird auch bereits ein System als „Leberersatz“ beschrieben, welches zellfrei und nur unter Einsatz spezieller Membranen arbeitet [1].

Eine dritte Strategie wird z.B. beim Ersatz von Blutstammzellen eingesetzt. Hierbei handelt es sich um die direkte Injektion von Zellen in den Patienten nach erfolgter Vermehrung der Zielzellen. Als ein Einsatzgebiet ist die Therapie bei Leukämie-Patienten zu nennen. Aus dem Knochenmark werden vor der Chemotherapie und/oder Bestrahlung mesenchymale Stammzellen gewonnen und vermehrt; nach Abschluss der Therapie können die Zellen dem Patienten verabreicht werden. Diese Form der Therapie zählt nicht direkt zum Tissue Engineering, es handelt sich hierbei um eine Zelltherapie.

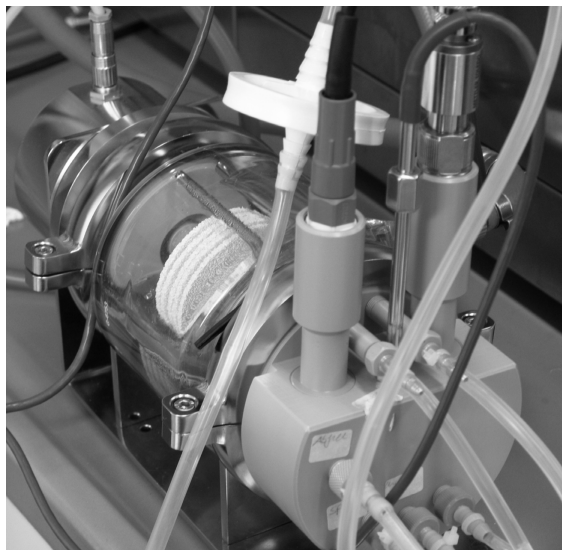
### **Wo ist der Bezug zur Technischen Chemie?**

Die bisher geschilderten Entwicklungen vermitteln den Eindruck, das Tissue Engineering wäre ein ausschließlich sehr medizinisch-chirurgisch und zell- und molekularbiologisch geprägtes Forschungsfeld. Dennoch lassen sich eine Vielzahl von Einflüssen aus dem Bereich der Chemie erkennen. So ist die Entwicklung von geeigneten Biomaterialien vor allem durch Chemiker der makromolekularen und Polymerchemie geprägt. Darüber hinaus kommen viele Biowerkstoffe auch aus den Labors der Anorganischen und Organischen Chemiker [2]. Die Techniken und Geräte, die im Bereich der physikalischen Chemie Einsatz finden, liefern wertvolle Beiträge zur Charakterisierung dieser Biomaterialien.

Technische Chemiker bearbeiten sich heute neben den eher „klassischen“ Themen auch Fragen zur Entwicklung optimaler Bioprozesse und Bioreaktoren für den Einsatz von Mikroorganismen und Säugerzellen mit dem Ziel der Produktion von z.B. Biopharmazeutika, Enzymen und Impfstoffen. Darüber hinaus werden hier weitere moderne Themen der Biotechnologie – so auch das Tissue Engineering – bearbeitet. Den Fokus bildet die Verknüpfung von Erkenntnissen im Bereich der Bioreaktortechnik, der Bioprozesstechnik (Steuerung und Regelung) sowie der Kultivierungsbedingungen von Zellen [3].



Keramisches Biomaterial für die Züchtung von Knochengewebe. Das makroporöse Material besteht aus einer Basis von Kalziumphosphat und ist hier in einer Zellkulturschale mit Medium gezeigt.



Bioreaktor für die Züchtung von künstlichen Gewebe (Biostat RBS, Zellwerk GmbH, Eichstätt). Das Biomaterial ist in diesem Drehbetteaktor auf einer Welle aufgebracht und wird langsam rotiert, so dass die mit Zellen besiedelten Scheiben in das Zellkulturmedium eintauchen. Der Reaktorraum ist für die Temperierung mit einem Glasgehäuse ummantelt. Erkennbar sind auch zahlreiche Versorgungsanschlüsse und Sonden zur Kontrolle und Steuerung von z.B. pH-Wert und Sauerstoffzufuhr.

### Limitierungen beim Tissue Engineering

Sicher werden nicht alle Erwartungen und Hoffnungen, die an das Tissue Engineering geknüpft werden, tatsächlich erfüllt.

Das Hauptproblem beim der Züchtung künstlicher Gewebe ist die Sicherstellung der Erhaltung der Differenzierung der Zellen. Nur so kann das neue Gewebe/Organ seine Funktionen korrekt erfüllen. Die Gewährleistung der Aufrechterhaltung physiologischer Parameter ist oft nur durch Schaffung komplexer organotypischer Kultivierungsverfahren möglich. Hierzu zählen die ausreichende Versorgung der Zellen (mit z.B. Sauerstoff, Wachstumsfaktoren und Nährstoffen) sowie die Eliminierung von schädlichen Metaboliten. Hierzu wird vor allem intensiv daran geforscht, wie eine Versorgung durch z.B. das Einwachsen von Blutgefäßen die Gewebe (Vaskularisierung) ermöglicht werden kann. Ein weiteres Problem stellt die Verfügbarkeit ausreichender Gewebemengen dar. Die Isolierung von primären Zellen ist aufwendig und die resultierenden Zellen nur begrenzt kultivierbar. Darüber hinaus beeinträchtigen die Langzeitkultivierungsbedingungen von ausdifferenzierten Zellen ihr Wachstum und sind somit für die Gewinnung großer Zellmengen nur bedingt geeignet. Ein weiterer Faktor ist in jüngerer Zeit erkannt worden; die meisten Zellen müssen zur Sicherstellung vollständiger Differenzierung und Funktionalität während der Kultivierung einem physiologischen Stress ausgesetzt werden (z.B. Druck- oder Zugbelastung). Dieses ist verständlich wenn man sich vorstellt, welchen Belastungen Herzklappen oder auch Knochen- und Knorpelgewebe im Körper ausgesetzt sind. Somit wird auch daran geforscht entsprechende Konditionierungsbedingungen in den Kulturgehaltern zu gewährleisten.

### Perspektiven

Es werden heute enorme Fortschritte in der Entwicklung geeigneter Kultivierungssysteme und Optimierung der Kultivierungsbedingungen gemacht. Es bleiben dennoch viele Fragen unbeantwortet und zahlreiche Probleme bisher ungelöst. Das Tissue Engineering ist eine Zukunftswissenschaft mit weitreichendem Potenzial. Besondere Bedeutung erlangen hier vor allem die neurodegenerativen Erkrankungen wie Morbus Alzheimer und Morbus Parkinson sowie Erkrankungen der inneren Organe (z.B. Leber) und des Stützapparates (Knochen und Knorpel). Darüber hinaus können Gewebeverbände und Organsysteme geschaffen werden, die dazu eingesetzt werden um z.B. Tierversuche zu vermeiden, denn viele Tests (*in vitro* Testung von Pharmaka in Zellkultur) können direkt an den entsprechenden Zellverbänden durchgeführt werden. Die Probleme der Speziesextrapolation (Übertragungsproblem der Medikamentenwirkung aus dem Tiermodell auf den Menschen) werden dadurch umgangen.

Diese Entwicklungen des Tissue Engineering hat ein enormes Potenzial; internationalen Voraussagen nach wird der „Gewebeingenieur“ als eine der Top-Berufsperspektiven der nächsten 10-20 Jahre angesehen (Time Magazin). Durch die Entwicklungen des Tissue Engineering wird eine neue Ära für die Lebenswissenschaften und die Medizin eingeleitet.

### **Literatur**

- [1] MARS Molecular adsorbens recirculation System: Firma Teraklin Rostock <http://www.teraklin.com/>
- [2] SCHÜGERL, K.: Bioreaktionstechnik: Bioprozesse mit Mikroorganismen und Zellen-Prozeßüberwachung. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin (1997)
- [3] EPPLER, M.: Biomaterialien und Biomineralisation. Teubner Studienbücher Chemie, Teubner Verlag, Wiesbaden (2003)

## Biophotonik: Einblicke in die Zelle\*

K.-H. GERICKE

Institut für Physikalische und Theoretische Chemie,  
Technische Universität Braunschweig,  
Hans-Sommer-Str. 10, D-38106 Braunschweig

### Wunsch und Möglichkeit

Nachdem das menschliche Genom entschlüsselt wurde, zielen viele Untersuchungen auf die Charakterisierung der Proteine und Enzyme ab, die als chemische Fabriken die molekularen Komponenten innerhalb einer Zelle liefern. Letztlich bestimmen die Prozesse dieser chemischen Substanzen das Verhalten einer Zelle. Daher ist es ein Wunschtraum der Bioanalytik Methoden zu entwickeln, die den Nachweis von biologisch relevanten (niedermolekularen) organischen Substanzen und ihren Wechselwirkungen mit anderen Komponenten des biologischen Systems ohne Eingriff in die natürliche Matrix biologischer Systeme erlauben. Besonders attraktiv wären Tests, bei denen die unmarkierten Biomoleküle oder niedermolekularen Substanzen und deren Interaktionen *in vivo* in mikroskopischen Bereichen intakter biologischer Organismen analysiert werden können. Wegen Ihrer hohen Sensitivität und der Möglichkeit in mikroskopischen Bereichen zu untersuchen, sind insbesondere optische Methoden für *in vivo* Untersuchungen geeignet. Daher sind in jüngster Zeit einige Versuche unternommen worden, optische Analysen auch markerfrei durchzuführen.

So ist es zum Beispiel möglich, routinemäßig den Sauerstoffpartialdruck bei Patienten nichtinvasiv über die spektrale Abhängigkeit des Häms vom Sauerstoffsättigungsgrad zu bestimmen. NADPH und Flavine sind andere niedermolekulare Co-Faktoren deren Fluoreszenzeigenschaften genutzt werden können, um wichtige Stoffwechselprozesse *in vivo* in mikroskopischen Bereichen zu untersuchen.<sup>1</sup> Auch die Primärprozesse der Photosynthese lassen sich sehr gut über die

---

\* Vortrag gehalten am 11.03.2005 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

<sup>1</sup> F.W.D ROST, „Fluorescence Microscopy“, vol II. Cambridge University. (1995) Press, New York, NY.

ausgeprägten spektralen Eigenschaften der Chlorophylle und Carotinoide erfassen.<sup>2,3</sup>

Die konfokale Scanning-Mikroskopie hat hier sehr große Fortschritte gebracht. Bei dieser Technik wird ein Laserstrahl durch ein Mikroskopobjektiv fokussiert und das auftretende Fluoreszenzlicht wird vom selben Objektiv gesammelt und nach spektraler Abtrennung vom anregenden Licht von einem Detektor registriert. Verschiebt man nun rasterartig den Laserstrahl, dann erhält man ein zweidimensionales Bild der Probe. Durch geschicktes Einbringen von Blenden im abbildenden Okular kann auch in der Tiefe einer Probe ein Bild aufgenommen werden, so dass es schließlich möglich ist dreidimensionale Bilder zu erhalten. Begrenzt wird diese Methode durch den Wellencharakter des Lichtes, oder präzisiert durch Beugungserscheinungen. Danach sind die Grenzen der lateralen Auflösung grob durch die halbe Wellenlänge des Laserlichts gegeben. D.h. ein „grüner“ Laserstrahl um 500 nm ermöglicht die Erkennung von Strukturen bis hinab zu ca. 250 nm. Es wird zwar an sehr trickreichen Methoden gearbeitet, um diese so genannte Abbésche Grenze zu überwinden, jedoch ist eine wirklich praktikable Nachweisttechnik, die diese Limitierung zu kleineren Größen verschiebt, bisher nicht in Sicht.<sup>4</sup>

Wir nutzen zur Anregung von Molekülen ebenfalls Laserlicht, jedoch typischerweise um 800nm, also an der oberen Grenze zum sichtbaren Spektralbereich. Auch mit dieser langwelligen Strahlung können Moleküle, die eigentlich erst bei 400 nm absorbieren, angeregt werden, wenn gleichzeitig zwei Photonen vom Molekül absorbiert werden. Man spricht in diesem Fall von einer Zweiphotonenanregung oder im Falle der Mikroskopie auch verkürzend von Zweiphotonenmikroskopie. Durch nichtlineare Anregung wird die Auflösung zwar prinzipiell gegenüber der klassischen Einphotonenanregung etwas besser, jedoch durch die längere Anregungswellenlänge wird dieser Vorteil wieder kompensiert.

<sup>2</sup> PULLERITS T. & SUNDSTROM V. "Photosynthetic light-harvesting pigment-protein complexes - toward understanding how and why" [Review]; *Accounts of Chemical Research*. 29(8):381-389, 1996 Aug. WEHLING, A. & P. J. WALLA, "Timeresolved Two-Photon Spectroscopy of PS I determines hidden Energy Path Ways", *Journal of Physical Chemistry B*, 109(38); 24510-24516 (2005).

<sup>3</sup> WEHLING & P. J. WALLA, "Timeresolved Two-Photon Spectroscopy of PS I determines hidden Energy Path Ways", *J. of Phys. Chem. B*, **109** (38) (2005), 24510-24516.

<sup>4</sup> KLAR, THOMAS A., STEFAN JAKOBS, MARCUS DYBA, ALEXANDER EGNER & STEFAN W. HELL, "Fluorescence microscopy with diffraction resolution barrier broken by stimulated emission", *PNAS* 97(15) (2000) 8206-8210; KASTRUP, L. & S.W. HELL "Absolute optical cross section of individual fluorescent molecules." *Angew. Chem. Int. Ed.* **43** (2004) 6646-6649; EGNER, A. & S.W. HELL, "Fluorescence microscopy with super-resolved optical sections." *Trends Cell Biol.* **15**(4) (2005) 207-215; KASTRUP, L., H. BLOM, C. EGGELING & S. W. HELL, "Fluorescence Fluctuation Spectroscopy in Subdiffraction Focal Volumes." *Phys. Rev. Lett.* **94**:1 (2005) 78104.

Wer einmal die hochauflösenden (und eingefärbten) Bilder einer Elektronenmikroskopaufnahme gesehen hat, wird sich fragen, wozu man überhaupt mit Licht – sei es mit der Einphotonen- oder auch Zweiphotonenanregung – arbeitet und nicht gleich alles mit dem Elektronenmikroskop bei Auflösungen von wenigen Nanometern untersucht. Der Grund hierfür ist in den Beschränkungen zur Aufnahme mittels eines Elektronenmikroskops zu suchen; denn diese Methode ermöglicht nur die Aufnahme von Gewebeschnitten, d.h. die Probe muss aufwändig präpariert werden und Informationen können nur über Oberflächenaufnahmen gewonnen werden. Aufnahmen aus der Tiefe des Gewebes oder gar *in vivo* Beobachtungen sind nicht möglich.

Die Zweiphotonenmikroskopie wird von unserer Arbeitsgruppe genutzt, um *innerhalb* von biologischen Proben bei einer hohen Eindringtiefe (von mehreren 100  $\mu\text{m}$ ) in Volumina von unter einem Femtoliter ( $<10^{-15} \text{ dm}^3$ ) schonende dreidimensionale Untersuchungen durchzuführen.

Damit ein Molekül zwei Photonen gleichzeitig absorbieren kann, müssen die Leistungsdichten besonders hoch sein, d.h. es müssen möglichst viele Photonen pro Zeiteinheit und Fläche vorhanden sein. Viele Photonen bedeutet eine hohe Energie, aber eine zu hohe Energie hat die Zerstörung des zu untersuchenden Gewebes zur Folge. Um diesem Dilemma zu entgehen, muss die Energie möglichst klein sein, aber die Zeit, in der die Photonen abgestrahlt werden, muss möglichst kurz sein. Hierzu setzt man einen Laserstrahl ein, der eine mittlere Leistung von nur 10 mW aufweist, was ca. der 10fachen Leistung kleiner handelsüblicher HeNe-Laser entspricht. Diese mittlere Leistung ist zu gering, um die Probe zu schädigen. Nun wird das Licht aber nicht kontinuierlich abgestrahlt, sondern 76 Millionen mal in der Sekunde. Jeder dieser Pulse hat daher nur eine Energie von  $10 \cdot 10^{-3} / 76 \cdot 10^6 \text{ Watt Sekunde} = 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ Joule} = 1,3 \text{ nJ}$ , also grob ein milliardstel Joule. Die zeitliche Länge eines einzelnen Pulses ist aber mit ca. 100 Femtosekunden so kurz, dass jeder dieser 76 Millionen Pulse pro Sekunde eine Leistung (=Energie/Zeit) von  $1,3 \cdot 10^{-9} / 100 \cdot 10^{-15} = 13 \cdot 10^3 \text{ Watt}$  oder 13 kW aufweist, also das 130 fache einer uns bekannten hellen Glühlampe von 100 Watt – allerdings nur für diese kurze Zeitspanne von 100 Femtosekunden.

Der Vorteil dieser aufwändigen Technik liegt gerade darin, dass nur im Fokus des Mikroskopobjektivs solch hohe Leistungsdichten auftreten, so dass nur hier eine Anregung eines Moleküls stattfinden kann. D.h. wenn es zur Zerstörung des Gewebes kommen sollte, dann nur im Fokus des Laserstrahls aber nicht längs des Laserstrahls, also nicht in allen Tiefen des Gewebes. Vor allem detektiert man aber nur Licht von der Fokalregion und nicht außerhalb, wodurch eine intrinsische Tiefenauflösung gewährleistet ist, denn Licht aus höheren oder tieferen Gewebeschichten wird – im Gegensatz zur Einphotonenanregung – nicht emittiert. Die Abbildung 1 veranschaulicht dieses Phänomen. Im linken Bild sieht man die Fluoreszenz einer (schwach konzentrierten) Farbstofflösung in

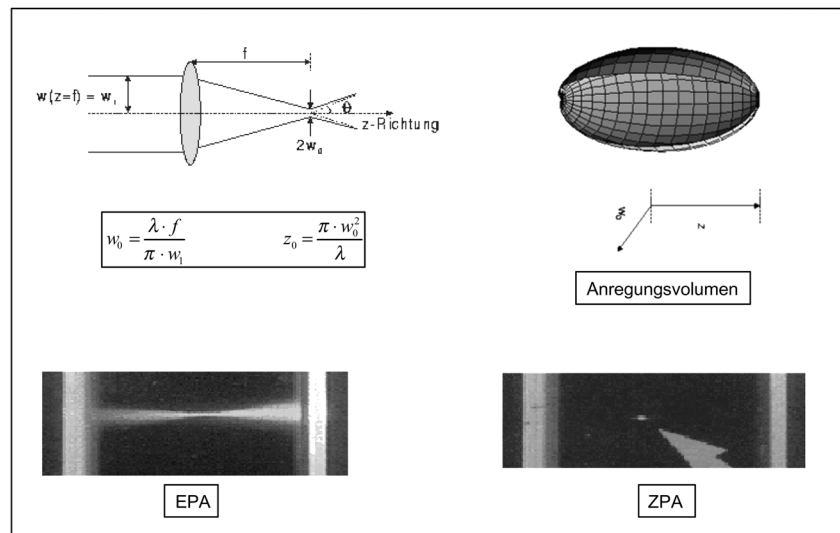


Abb.1: Der Strahldurchmesser im Fokus bestimmt die (laterale) Auflösung. Bei den besten Optiken liegt die Grenze bei ca.  $1/2$ . Bei der Einphotonenanregung (EPA) werden alle Moleküle längs des Laserstrahls angeregt, während bei der Zweiphotonenanregung (ZPA) nur eine Absorption im Fokusbereich auftritt (s. Pfeil). Daher besitzt die ZPA eine intrinsisch gute Tiefenauflösung. Das Anregungs- und Beobachtungsvolumen entspricht dann einem Ellipsoid (s. oben rechts).

einer Küvette bei der Einphotonenanregung längs des Lichtweges, während im rechten Bild nur Licht aus dem Fokusbereich emittiert wird.

Dem komplexeren Lasermesssystem steht also eine gewebeschonendere Untersuchungsmethode mit sehr guter Tiefenauflösung gegenüber. Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist die Verwendung von langwelligem Licht, denn dieses wird vom Gewebe kaum absorbiert, so dass hierdurch Moleküle in tieferen Gewebeschichten angeregt werden können. Aufgrund der Verwendung eines gepulsten Laserstrahls, werden zeitaufgelöste Messungen möglich, d.h. die Dynamik zellulärer Prozesse kann leichter analysiert werden. Im Folgenden sollen einige Resultate zu Prozessen in der Haut, die mit Hilfe dieser Untersuchungstechnik aufgeschlüsselt werden konnten, vorgestellt und diskutiert werden.

### Charakterisierung von Hautkonstrukten mittels Zweiphotonenmikroskopie

Langwelliges Licht um 800 nm dringt besonders tief in das Gewebe ein, so dass hierdurch Untersuchungen im Inneren tiefer gelegener Zellschichten möglich



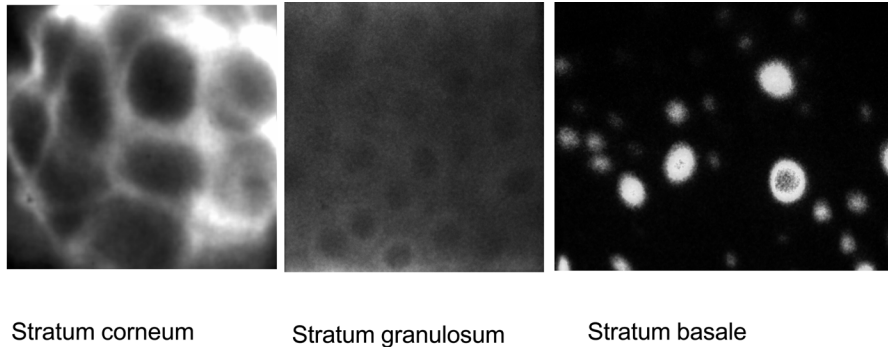


Abb.2: Einige lasermikroskopische Aufnahmen der menschlichen Haut in unterschiedlichen Tiefen. Die Struktur der jeweiligen Schichten ermöglicht eine einfache Zuordnung.

sind. Die erzielbare Tiefe hängt von der gewünschten Auflösung ab. Um noch Auflösungen unterhalb eines Mikrometers zu erzielen, liegt die maximal mögliche Tiefe bei wenigen hundert Nanometern.

Die Abbildung 2 zeigt typische Beispiele von lasermikroskopischen Aufnahmen der menschlichen Haut (Dermis) in unterschiedlichen Tiefen. Im Bild links ist das Stratum corneum gezeigt. Mit zunehmender Tiefe erkennt man die jeweils typischen Strukturen, wie das Stratum granulosum (Abb. 2 Mitte) und das weiter unten liegende Stratum basale (Abb. 2 rechts).

In Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis von Frau Müller-Goymann (Institut für Pharmazeutische Technologie, TU Braunschweig) wurden Hautkonstrukte hinsichtlich ihrer Struktur analysiert, um detaillierte Einblicke für einen möglichen künstlichen Hautersatz zu erhalten. Der Abb. 3 ist zu entnehmen, dass diese Hautkonstrukte in der Tat einen vergleichbaren Aufbau zur natürlichen menschlichen Dermis besitzen. In den oberen Schichten der Epidermis erkennt man die Keratinocyten (Abb. 3 links), die mit zunehmender Tiefe immer klarer als intakte Zellen zu erkennen sind. In noch tieferen Schichten sind die länglichen Fibroblasten zu erkennen. Diese sind beliebig orientiert, so dass je nach Lage unterschiedliche Ausschnitte bei einer lasermikroskopischen Aufnahme gesehen werden.

Für diese Aufnahmen musste nur die Fluoreszenzintensität registriert werden. Im nachfolgenden Abschnitt sollen Beispiele aufgeführt werden, welche zusätzlichen Fortschritte erzielt werden können, wenn auch die Fluoreszenzdauer analysiert wird.

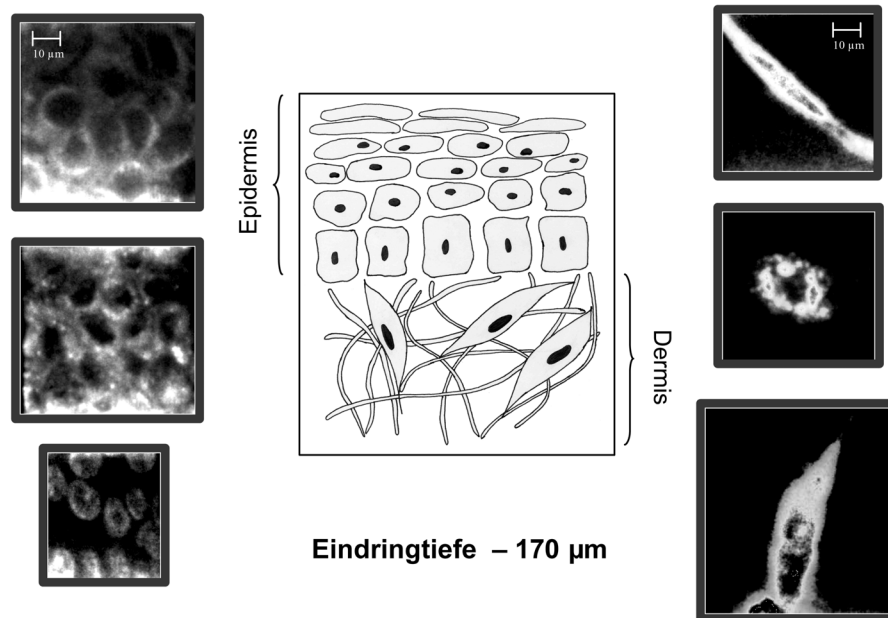


Abb.3: Die Hautkonstrukte zeigen einen vergleichbaren Aufbau wie die natürliche Haut. Auf der linken Seite sind die Keratinocyten zu sehen. Auf der rechten Seite sind Aufnahmen der tiefer liegenden länglichen Fibroblasten zu sehen, die in der Haut – im Gegensatz zur Zeichnung in der Mitte – sehr unterschiedlich orientiert sein können. So ist im mittleren Bild ein Querschnitt zu sehen, während im unteren rechten Bild eine Zelle (zufällig) im Längsschnitt zu beobachten ist.

### Fluoreszenzlebensdauer und Zellparameter

Die Fluoreszenzlebensdauer eines Chromophors hängt nicht nur vom Molekül, sondern auch von der molekularen Umgebung ab. Die typischen Fluoreszenzlebensdauern liegen im Bereich von einigen hundert bis wenigen tausend Piko- sekunden (wenige Nanosekunden). Durch die molekulare Umgebung kann der angeregte elektronische Zustand im Molekül deaktiviert werden, so dass sich die Lebensdauer verkürzt. Es kann aber auch sein, dass beispielsweise die Lebensdauer des Moleküls durch interne Energierumlagerungen (typischerweise ein Übertrag der elektronischen Energie in vibronische Anregung) verkürzt wird. „Dockt“ ein solches Molekül beispielsweise an ein Protein an, dann wird diese interne Energieübertragung unter Umständen verringert und als Folge davon steigt die Fluoreszenzdauer an.

Um diese Effekte bei der Analyse von Zellparameter, wie Brechungsindex  $n$ , Viskosität  $\eta$ , pH-Wert,  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration, auszunutzen, ist es wichtig, Farb-

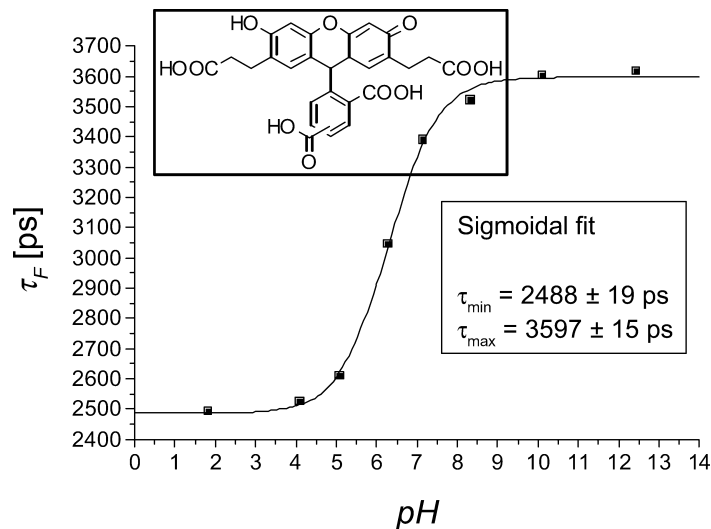


Abb. 4: Die Fluoreszenzlebensdauer des Farbstoffes BCECF (oben) hängt stark und nahezu ausschließlich vom pH-Wert im physiologisch interessanten Bereich um pH 7 ab. Eine Messung der Fluoreszenzlebensdauer ermöglicht daher eine Bestimmung des pH-Wertes mit einer Genauigkeit von ca. 0,01 und dies für jeden Pixel der Kamera, d.h. mit optischer Auflösung von einigen hundert Nanometern.

stoffe auszuwählen, deren Fluoreszenzlebensdauer möglichst nur von einem dieser Parameter beeinflusst wird, während die anderen Parameter der molekularen Umgebung den Wert weitgehend unverändert belassen.

Ein Beispiel ist der Abb. 4 zu entnehmen. Der Fluorophor 2',7'-bis-(2-Carboxyethyl)-5/6-Carboxyfluorescein (BCECF), dessen Struktur ebenfalls der Abbildung zu entnehmen ist, hat eine Fluoreszenzlebensdauer von ca. 2500 ps bis 3600 ps, je nach pH-Wert. Gerade im physiologisch wichtigen Bereich zwischen pH 6 und pH 8 ändert sich dessen Lebensdauer sehr stark. Das eingesetzte Kamerasystem ist in der Lage, die Fluoreszenzintensität nur innerhalb eines kurzen Zeitabschnitts von wenigen hundert Pikosekunden aufzunehmen. Verschiebt man nun zeitlich diesen Detektionszeitabschnitt vom unmittelbaren Beginn des anregenden Laserpulses zu späteren Zeiten, also einige tausend Pikosekunden, dann gelingt es, die Fluoreszenzintensität als Funktion der Zeit aufzunehmen. Im einfachsten Fall ergibt sich eine exponentielle Abnahme,

$$I_{fl} = I_0 e^{-t/\tau},$$

aus der die Fluoreszenzlebensdauer  $\tau$  extrahiert werden kann.<sup>5</sup> Die erzielbare Genauigkeit ist besser als 20 ps, so dass daher der pH-Wert auf zwei Stellen hinter dem Komma gemessen werden kann.

Dabei ist es wichtig, dass dieser pH-Wert nicht etwa ein integraler Wert aus einem großen Volumen ist, sondern er ist örtlich so weit aufgelöst, wie es die optische Auflösung ermöglicht, d. h. besser als ein Femtoliter, so dass subzelluläre Messungen möglich sind.

### **Beispiel einer Zellparameter-Messung: 3D-Visualisierung des pH-Wertes**

Für die 3D-Visualisierung des pH-Wertes in der Dermis eines künstlichen Hautkonstrukts wurde dieses wie oben ausgeführt mit BCECF angefärbt und dessen Fluoreszenzlebensdauer als idealer pH-Indikator genutzt, um den schützenden Säuremantel der künstlichen Dermis mit Hilfe von FLIM zu charakterisieren. Analog zur menschlichen Dermis ist der pH-Wert der obersten Schicht der künstlichen Dermis niedrig (5,9) nimmt aber in den tieferen Schichten bis zu einem pH-Wert von 7,15 zu. Die qualitative Abhängigkeit des pH-Wertes von der Position der vermessenen dermalen Schicht ist in Abbildung 5 zu erkennen.

Eine zusätzliche Erkenntnis der 3D-FLIM-Experimente an mit BCECF angefärbte künstliche Dermis ist, dass die Zunahme des pH-Wertes mit der Tiefe  $z$  der dermalen Schicht unterschiedlich in Zellinneren bzw. in der extrazellulären Matrix ist. An der Oberfläche der Dermis beträgt sowohl der pH-Wert der Zellen als auch der pH-Wert der extrazellulären Matrix ca. 5,9. Der pH-Wert steigt im Zellinneren nach 10  $\mu\text{m}$  Tiefe bis zu einem Wert von 7,2 an und bleibt dann in den tieferen Schichten konstant, während der pH-Wert der extrazellulären Matrix noch stetig zunimmt, jedoch nicht über einen Wert von 6,6. Das Diagramm 6 stellt diese pH-Abhängigkeit quantitativ dar.

Das Fluoreszenzlebensdauer-Imaging (FLIM) bietet also die Möglichkeit, Zellparameter, z.B. Brechungsindex, pH-Wert oder  $\text{Ca}^{2+}$  Konzentration, mit subzellulärer Auflösung sowohl in Zellen als auch im intakten Gewebe zu messen. Ein wichtiger Vorteil der Fluoreszenzlebensdauerbestimmung ist auch, dass diese nicht vom Grad der Einfärbung abhängig ist, da die Dauer prinzipiell unabhängig von der Intensität gemäß obiger Formel ist.

---

<sup>5</sup> NIESNER, R., W. ROTH & K.-H. GERICKE, "Photophysical aspects of single molecule detection by two-photon excitation considering sequential pulsed illumination", Chem. Phys. Chem., **5** (2004) 678-687.

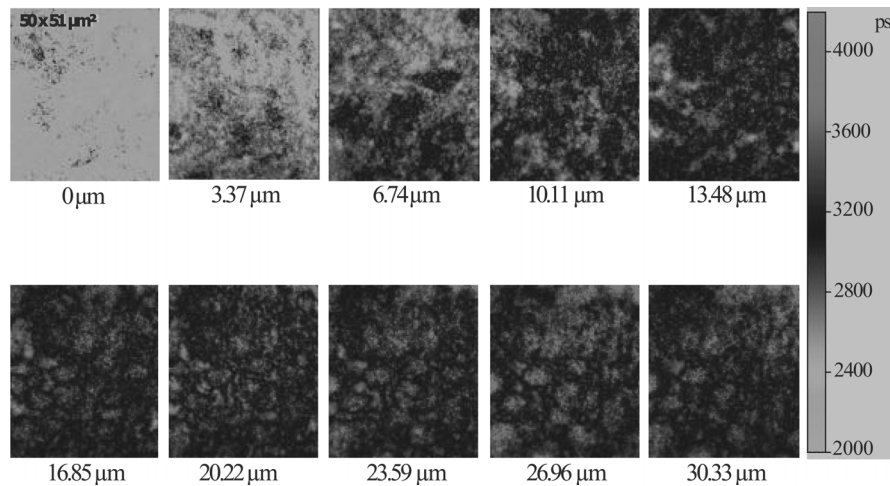


Abb 5: Fluoreszenzlebensdauer-Bilder eines mit BCECF abgefärbten Hautkonstrukts, die in verschiedenen Tiefen  $z$  (angegeben in  $\mu\text{m}$ ) des Gewebes aufgenommen wurden. Die Fluoreszenzlebensdauer nimmt mit steigendem pH-Wert zu. Der pH-Wert in den Zellen erreicht eher, d.h. schon bei geringerer Tiefe, den Neutralwert als die extrazelluläre Matrix

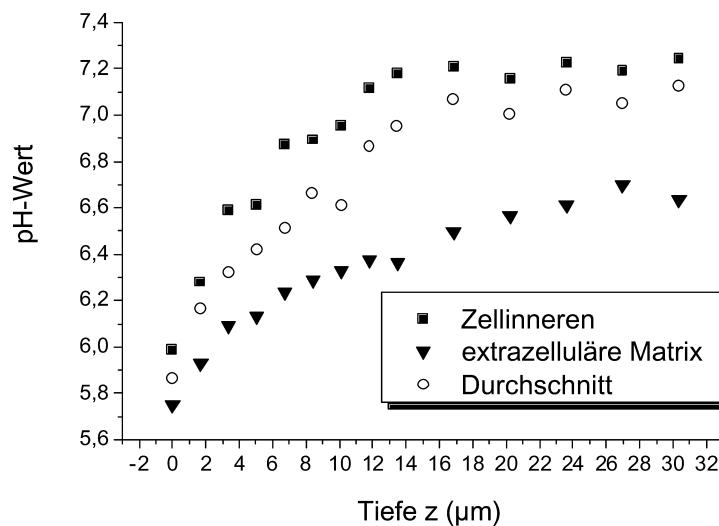


Abb. 6: Quantitative Abhängigkeit des pH-Wertes von der Tiefenposition  $z$  der dermalen Schicht.

### NADH und NADPH Zellmetabolismus

Ein Einfärben der Zellen ist nicht immer notwendig. So kann die Eigenfluoreszenz bestimmter Moleküle, vor allem die von NADH, NADPH und ATP, genutzt werden, um den Zellmetabolismus näher aufzuklären. Als Beispiel sollen die für die Insulinproduktion verantwortlichen Langerhansschen Zellen analysiert werden. Die Abbildung 7 stellt die NADH und NADPH Eigenfluoreszenz von B-MIN6 Zellen (Langerhanssche Zellen = Pankreaszellen) nach Zwei-Photonen-Anregung bei 760 nm dar. Die Coenzyme NADH und NADPH (kurz NAD(P)H) sind wesentliche Bausteine des Energiehaushaltes der Zelle, die während eines metabolischen Prozesses an Enzymen koppeln und so als Elektronen-Carrier in biochemischen Redox-Reaktionen, z.B. reduktive Biosynthese von Makromolekülen oder ATP-Synthese, fungieren.

Eine sehr hohe NAD(P)H-Fluoreszenzintensität ist in kleinen, punktförmigen Organellen zu beobachten, die den für die Energieproduktion der Zelle zuständigen Mitochondrien zu zuordnen sind, während der Zellkern mit einem sehr geringen NADH und NADPH Anteil dunkel erscheint. Das Cytosol zeigt eine mäßige NAD(P)H-Fluoreszenz.

Die Gesamtintensität der NAD(P)H Eigenfluoreszenz gibt Auskunft über die Verteilung der zwei Coenzyme in der Zelle und über die damit verbundenen metabolischen Prozesse. Diese Information ist allerdings nur qualitativ. Eine quantitative Darstellung des NAD(P)H Redox-Metabolismus in der Zelle ist mit Hilfe des Fluoreszenzlebensdauer-Imagings (FLIM) möglich.

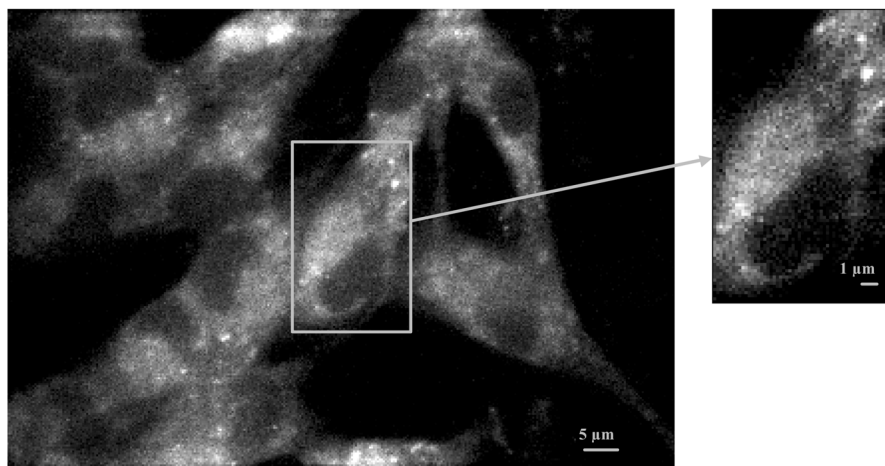


Abb. 7: NADH und NADPH Eigenfluoreszenz von B-MIN6 Zellen (Pankreaszellen) nach Zwei-Photonenanregung.

Die Fluoreszenzlebensdauer des freien, inaktiven NAD(P)H ( $\tau \cong 400$  ps) unterscheidet sich nämlich stark von der Fluoreszenzlebensdauer des enzym-gebundenen NAD(P)H ( $\tau \cong 2000$  ps), also jenem NAD(P)H, das sich zu einem metabolischen Prozess gerade beteiligt. Die zeitliche Veränderung der Fluoreszenz ist dann biexponentiell:

$$I_{fl} = I_{01} e^{-t/\tau_1} + I_{02} e^{-t/\tau_2}.$$

Die Zeiten  $\tau_1$  bzw.  $\tau_2$  charakterisieren dann das freie bzw. das gebundene NAD(P)H und mit Hilfe von  $I_{01}$  und  $I_{02}$  erhält man auch deren relativen Anteil. Somit erhält man neben den Fluoreszenzlebensdauer-Bildern des aktiven bzw. inaktiven NAD(P)H auch ein Bild, das den Redox-Zellmetabolismus mit subzellulärer Auflösung widerspiegelt.<sup>6</sup>

Die Abbildung 8 stellt das Ergebnis der biexponentiellen FLIM Auswertung des NAD(P)H-Eigenfluoreszenzbildes eines humanen dermalen Fibroblasten, der sich in 70  $\mu$ m Tiefe in einem künstlichen 3D-Hautkonstrukt befindet. Wie erwartet, beträgt die Fluoreszenzlebensdauer des freien NAD(P)H ca. 400 ps, während die Fluoreszenzlebensdauer des enzymgebundenen NAD(P)H im Durchschnitt bei 2200 ps liegt. Im Fluoreszenzlebensdauerbild des enzymgebundenen NAD(P)H ist eine weite Streuung (über 1000 ps) der Lebensdauerwerte um den Mittelwert zu erkennen, was auf die unterschiedlichen Enzym-NAD(P)H-Komplexe zurückzuführen ist.

Das Bild 8, oben rechts, in dem der relative Anteil des enzymgebundenen NAD(P)H hoch aufgelöst dargestellt ist, spiegelt den NAD(P)H-Metabolismus der Zelle wider.

Die Unterschiede in der Fluoreszenzlebensdauer der NAD(P)H-Enzym-Komplexe, wie sie in wiederholten Experimenten mit verschiedenen Zelltypen beobachtet worden sind, können die Basis neuartiger Messmethoden für den *in vivo* Nachweis von NADH und NADPH Enzymen darstellen. Ein Beispiel dafür ist der Nachweis des Enzyms NADPH Oxidase (NOX2) aus Neutrophilen (Zellen des Immunsystems), das während der Phagocytose aktiviert wird und somit zur chemischen Zerstörung von Fremdkörper, z.B. Pilze, Bakterien und Viren, beiträgt. Die in Vergleich zu mitochondrialen NAD(P)H-Enzym-Komplexen sehr lange Fluoreszenzlebensdauer des NADPH-NOX2-Komplexes erlaubt eine dynamische und quantitative Beobachtung der Aktivierung von NOX2 mittels biexponentielles FLIM.

---

<sup>6</sup> NIESNER, R., B. PEKER, P. SCHLÜSCHE & K.-H. GERICKE, "Non-iterative biexponential fluorescence lifetime imaging in the investigation of cellular metabolism by means of NAD(P)H autofluorescence", Chem. Phys. Chem., **5** (2004) 1141-1149.

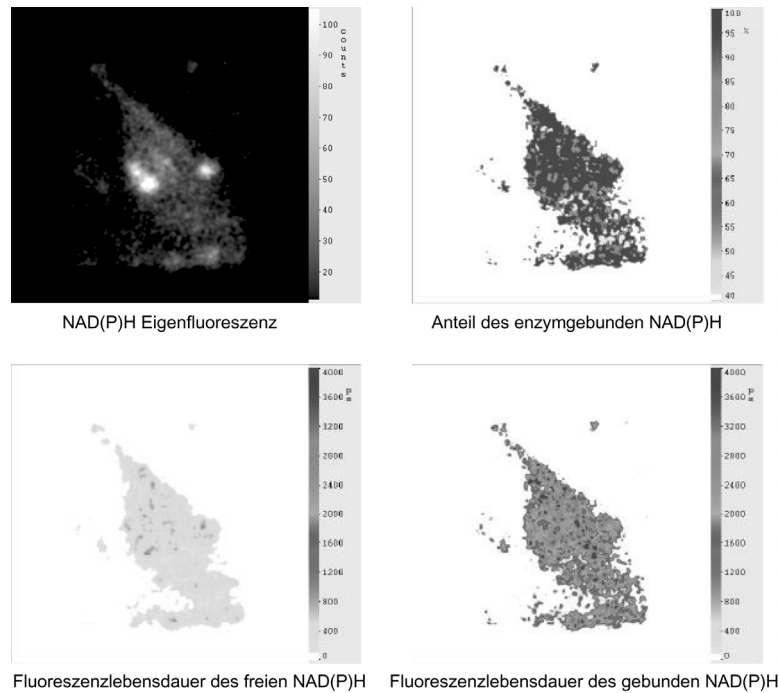


Abb. 8: Ergebnis der biexponentiellen FLIM Auswertung des Eigenfluoreszenzbildes eines Fibroblasten in einem künstlichen Hautkonstrukt.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass nichtlineare optische Techniken Wesentliches und Neues zur Aufklärung biologischer Phänomene beitragen. So haben wir beispielsweise das Zwei-Photonen FLIM weiterentwickelt, um proteingebundenes NAD(P)H von freiem zu unterscheiden und dies mit subzellulärer Auflösung. Weiterhin können wir grundlegende biophysikalische Parameter von Zellen bestimmen, nicht nur – wie weiter oben gezeigt – den pH-Wert ( $\Delta\text{pH} = \pm 0,01$ ), sondern auch die  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration, die Viskosität ( $\Delta\eta = \pm 0,002$ ), oder den Brechungsindex  $n$  ( $\Delta n = \pm 0,005$ ), ebenfalls mit subzellulärer Auflösung innerhalb eines Gewebeverbundes.



## Vom Polymer zur Brennstoffzelle\*

GUDRUN SCHMIDT-NAAKE

Technische Chemie, Technische Universität Clausthal  
Erzstr. 18, D-38678 Clausthal-Zellerfeld

Die Brennstoffzellen gelten als die Schlüsselemente einer künftigen Energieversorgung. Diese innovative Zukunftstechnologie ist prinzipiell für mobile Anwendungen (z.B. in Automobilen, Schiffen, Bahn, Laptops, Handys usw.) und für stationäre umweltfreundliche Energieversorgung (z.B. von Gebäuden und Industrieanlagen) von großem Interesse. Prognosen der Automobilindustrie erwarten allein in Deutschland einen Bedarf an Brennstoffzellen für ca. fünf Millionen Fahrzeuge bis 2010, das entspricht etwa zehn Prozent des Bestandes.

In der **Brennstoffzelle** (engl.: fuel cell, FC) wird die chemische Energie eines Brennstoffs und eines Oxidationsmittels direkt in elektrische Energie umgewandelt. Als Brennstoffe werden bisher hauptsächlich Wasserstoff oder Methanol („direct methanol fuel cell“, „DMFC“) verwendet, wobei das Wasserstoffgas entweder in reiner Form aus einem Speichermedium (z.B. Drucktank oder Metallhydridspeicher) oder in einem vorgeschalteten Reformationsprozess aus Erd-, Synthese- oder Biogas erzeugt wird.

Bei der Redoxreaktion zwischen Wasserstoff und Sauerstoff als Oxidationsmittel werden die beiden Reaktionsräume in Anodenraum (Oxidation,  $\text{H}_2 \rightarrow 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$ ) und Kathodenraum (Reduktion,  $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$ ) getrennt. Die Elektronenabgabe bzw. -aufnahme findet an den mit einem Katalysator (meist Platin oder Nickelverbindungen) belegten Gasdiffusionselektroden statt, und die Elektronen können so über einen externen elektrischen Verbraucher geführt werden. Der äußeren Elektronenleitung entspricht eine innere Ionenleitung durch einen Elektrolyten. Im Falle der Protonenleitung kombinieren die  $\text{H}^+$ -Ionen und die  $\text{O}^{2-}$ -Ionen an der Kathodenseite zu Wasser ( $2 \text{H}^+ + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ ), das hierbei als einziges Produkt anfällt. Eine schematische Darstellung einer PEM-Brennstoffzelle zeigt Bild 1.

Da eine durchschnittliche Brennstoffzelle unter Last etwa eine Spannung von 0,5 - 0,7 V liefert, werden einige hundert solcher Zellen seriell in einem Stapel

---

\* Vortrag gehalten am 09.07.2005 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

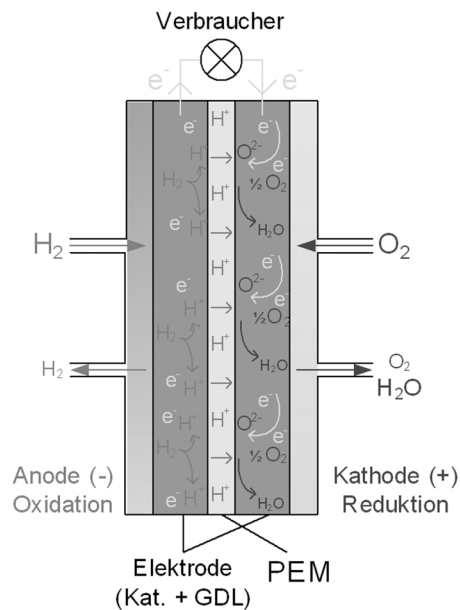


Bild 1: Schematische Darstellung einer PEM-Brennstoffzelle mit Wasserstoff und Sauerstoffspeisung, GDL = gas diffusion layer (Gasdiffusionsschicht).

(„stack“) verbunden. Die Endplatten fungieren dabei beidseitig sowohl als Kathode als auch als Anode und werden als Bipolarplatten bezeichnet. Die Anordnung aus Membran, Katalysator und Elektroden, die unter Erhitzung aufeinander gepresst werden, wird als MEA („membrane electrode assembly“) abgekürzt und stellt das Herzstück einer Brennstoffzelle dar.

In einer PEMFC trennt eine Polymermembran die beiden Elektrodenräume voneinander. Der Ionentransport findet als Protonenleitung durch die Folie statt. Dementsprechend werden für solche Systeme eine hohe ionische bei gleichzeitig geringer elektrischer Leitfähigkeit, eine hohe chemische Beständigkeit gegen Peroxide, Hydrolyse- und Redoxreaktionen, sowie eine hohe mechanische Stabilität der Folien auch bei Dicken von 50 - 100  $\mu\text{m}$  gefordert.

Die herkömmlichen Brennstoffzellenmembranen bestehen aus einem thermisch und chemisch stabilen polymeren Grundgerüst (z.B. einem per- oder teilfluorierten System), einer an diese feste Phase angebundenen Säurefunktion als protogene Gruppe (Protonendonator, z.B. Sulfonsäure) und Wasser als mobile Phase und Protonenlösemittel, vgl. Bild 2.

Bekanntester Vertreter ist die auch in laufenden Systemen verwendete Nafion<sup>®</sup> - Membran der Firma DUPONT, die auf einem perfluorierten Rückgrat und

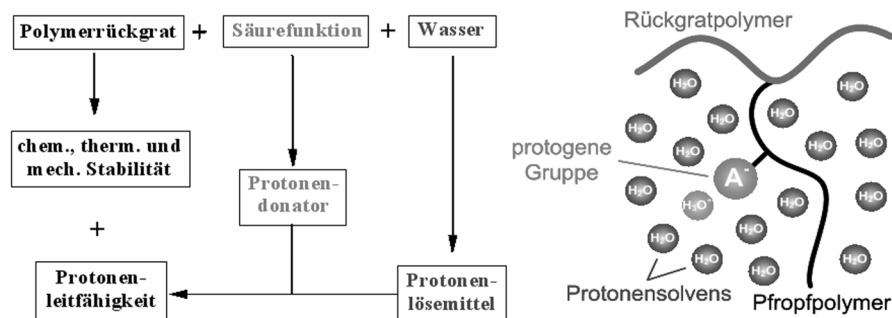


Bild 2: Schematischer Aufbau einer PEM.

Rückgratpolymer – Pffropfpolymer mit protonogene Gruppe – Wasser als Protonenlösemittel

supersauren Perfluorsulfonsäure-Funktionen (PFSA) basiert. Ähnliche Systeme mit prinzipiell gleichem Aufbau werden auch von den Firmen ASASHI GLASS (Flemion® - Membran), ASASHI CHEMICALS (Aciplex® - Membran) und DOW CHEMICAL (Dow® - Membran) angeboten. W. L. GORE & ASSOCIATES stellt eine Membran her, die aus gerecktem Poly(tetrafluorethylen) besteht und deren Poren mit einem nafionartigen Ionomer gefüllt sind (Gore Select®).

Diese Perfluorsulfonsäure-Membranen haben einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten der Brennstoffzelle. Weltweit gibt es deshalb zahlreiche Aktivitäten zur Entwicklung von neuen Membranmaterialien. Kriterien für einen Vergleich der Membranen stellen Eigenschaften wie hohe spezifische Leitfähigkeit ( $>0,1 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ), gutes Wasserbindevermögen unter PEMFC-Betriebsbedingungen, lange Lebensdauer ( $> 5$  Jahre), Undurchlässigkeit für  $\text{H}_2$  bzw. andere Brennstoffe wie Methanol und  $\text{O}_2$ , hohe mechanische Stabilität und geringe Kosten ( $< \text{US\$ } 200/\text{m}^2$  für  $100 \mu\text{m}$  Membrandicke) dar.

Entwicklungsbedarf bei den Membranen besteht in kostengünstigen Varianten der PEM mit gleichen oder besseren Eigenschaften.

Durch strahlungsinduziertes Pffropfen von Styrol auf fluorierten Folien<sup>[1]</sup>, wie Poly(tetrafluoroethylen-*alt*-ethylen) (ETFE), Poly(tetra-fluoroethylen-*co*-hexafluoropropylen) (FEP) und Polyvinylidenfluorid (PVDF) sind durch anschließende Sulfonierung der gepfropften Styroleinheiten Kationenaustauschmembranen zugänglich. Die Vorteile dieser Membranen sind in hohen Austauschkapazitäten ( $>2 \text{ meq/g}$ )<sup>[1]</sup> im Vergleich zu kommerziell erhältlichen Membranen wie Nafion 117 ( $\sim 1 \text{ meq/g}$ ), in hohen Leitfähigkeiten ( $\sigma(90^\circ\text{C}) > 0,1 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ )<sup>[2,3]</sup> und in niedrigen Herstellungskosten zu sehen. Als Nachteile stehen eine ungenügende Stabilität gegen Oxidations- und Reduktionsmittel sowie eine starke Quellung gegenüber<sup>[4]</sup>.

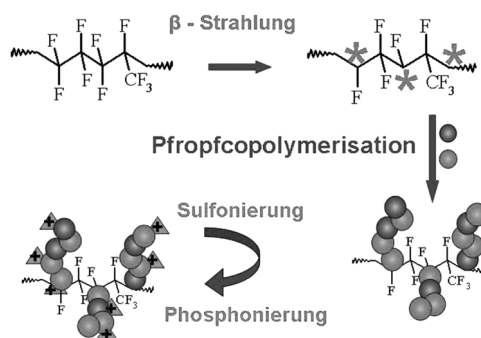


Bild 3: Schema der PEM-Herstellung.

Das Verhalten der Styrol-Membran ist vergleichbar mit Nafion<sup>®</sup>, nicht jedoch die Stabilität der Membran gegenüber Sauerstoff.

Um den oxidativen Membranabbau durch Sauerstoff, der immer in der Brennstoffzelle vorhanden ist, zu reduzieren, wurden von uns Membranen entwickelt, die nicht ausschließlich auf Polystyrolsulfonsäure beruhen.

Kommerzielle fluorhaltige und fluorfreie Polymerfolien werden durch β-Strahlung aktiviert und anschließend mit oxydationsstabileren Monomeren gepfropft.

Bild 3 zeigt schematisch die Herstellung der Protonen-Austausch-Membranen.

Die Einführung der Säuregruppen kann direkt über die Monomere oder nachträglich durch Sulfonierung bzw. Phosphonierung, d.h. durch Umsetzungen mit säurehaltigen niedermolekularen Verbindungen erfolgen.

Durch die Verwendung dieser Pfropfpolymere und den Einsatz von Acrylatvernetzern kann die Stabilität der Membranen in oxidativer Umgebung erheblich verbessert werden.

Wichtige Eigenschaften der Membranen, wie Oxydationsstabilität, Austauschkapazität, Quellverhalten, Leitfähigkeit usw. liegen besser als bei Nafion<sup>®</sup> und ermuntern uns daher, diese neuartigen PEM weiter zu entwickeln.

Die Arbeiten erfolgten im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramm 322 1060 „Neuartige Schichtstrukturen für Brennstoffzellen“.

### Literatur

- [1] WALSBY, N. & F.SUNDHOLM: *J. Polym. Sci., Part A: Polym Chem*, **2000**, 38, 1512; **2001**, 39, 3008

- [2] LEHTINEN, T. & G. SUNDHOLM: *J. Appl. Electrochem.* **1999**, 29, 677
- [3] KALLIO, T. & M. LUNDSTRÖM: *J. Appl. Electrochem.* **2002**, 32, 11
- [4] BÜCHI, F., B. GUPTA, O.HASS & G. SCHERER: *Electrochim. Acta* **1995**, 40, 345



## **„Wer ist der Mensch, der sich vermessen will, des Zufalls schweres Steuer zu regieren?“ Kontingente Welt und problematisches Individuum in Schillers *Don Karlos*\***

RENATE STAUF

Neuere deutsche Literatur, TU-Braunschweig  
Bienroder Weg 80, D-38106 Braunschweig

Schillers *Don Karlos* ist in der europäischen bildenden Kunst, in der Literatur und in der Theaterarbeit nahezu lückenlos präsent. Er gehört zu den meist gespielten Stücken in Deutschland nach dem zweiten Weltkrieg. Allein die Spielzeit 2004/05 weist vier prominente Neuinszenierungen auf: in Wien (Andrea Breth), Hamburg (Laurent Chétouane), München (Sebastian Nübling) und Hannover (Wilfried Minks).

Nicht zuletzt diese erstaunliche Karriere des *Don Karlos* deutet auf einen Aspekt von Modernität in Schillers Theaterarbeit, der in der Schiller-Forschung bisher wenig in den Blick gekommen ist: auf die Erfahrung und Gestaltung einer kontingenten Welt. Allzu beliebt ist die Vorstellung von Schiller als Universalhistoriker oder als Vordenker des deutschen Idealismus und allzu selbstverständlich ist eine Interpretationspraxis geworden, die zeitlose Ideale und ewige Wahrheiten in seinem Werk sucht, damit aber nicht selten hinter ein Problembewusstsein zurückfällt, das Schiller selbst bereits entwickelt hat. Anders als in seiner ästhetischen Theoriebildung und in seinen geschichtsphilosophischen Spekulationen, die durchaus als Versuch verstanden werden können, so etwas wie subjektive und soziale Kohärenz herzustellen – also eine verlässliche und nachhaltige Identität, sowohl des Individuums als auch der Gesellschaft –, verzichtet Schiller als Dramatiker darauf, eine Welt darzustellen, die es erlaubte, zukünftige Möglichkeiten zureichend aus der gegenwärtigen Wirklichkeit abzuleiten. Auf der Experimentierbühne seines Theater geht es nicht um Kontingenzbewältigung oder Kontingenzaufhebung, sondern in einem eminent modernen Sinn um Kontingenztoleranz. Die Fragen, ob der Mensch frei handeln kann oder ob ihn die Geschichte unfrei macht, ob sich menschliches Handeln auf einen personalen Kern zurückführen lässt oder ob das Sein sich dabei an die Rolle verliert, bleiben hier wohlthuend unentschieden.

---

\* Kurzfassung eines Vortrags gehalten am 14.10.2005 vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft. (Die ungekürzte Fassung des Vortrages erscheint demnächst in der Zeitschrift *Euphorion*)

Nach dem *Fiesco* ist *Don Karlos* Schillers zweites Drama, in dem er sich weniger als ein Schüler Kants denn als Schüler der skeptischen Geschichtsschreibung David Humes und William Robertsons erweist. Verschiedene Gestaltungsmomente sind hier zu nennen:

1. Der Verzicht auf einen eindeutig erkennbaren Helden, eine zentrale tragische Figur. Die Perspektive der Familientragödie und die Idee der Freundschaft rücken Don Karlos ins Zentrum des Geschehens, während unter dem Aspekt des Politischen Marquis Posa oder König Philipp zu den dominanten handlungstragenden Figuren werden.
2. Der Glaube an die Gesetze historischer Kausalität erscheint auf der Ebene des Agierens der Figuren als etwas Fiktionales. Völlig unentschieden bleibt am Ende, wem die Zukunft recht geben wird: der geschichtsteleologischen Freiheitsvision Posas („Das Jahrhundert ist meinem Ideal nicht reif.“), der geschichtspessimistischen Resignation des enttäuschten Königs („Er ist mein einziger Sohn – Wem hab ich gesammelt?“) oder der Macht- und Kontrollbesessenheit einer allgegenwärtigen Inquisition („Das Seil, an dem / Er flatterte war lang, doch unzerreißbar“).

Im *Don Karlos* wird somit offenbar, dass nicht Planung oder politischer Wille die Veränderungen in der Geschichte bewirken, sondern der Zufall. Prozess und Ergebnis der Geschichte erscheinen dementsprechend kontingent. Objektive Geschichtsaussagen werden als subjektive Deutungsinteressen kenntlich gemacht, indem sie immer an einen fragwürdigen personalen Status gebunden bleiben. Das Drama problematisiert die menschliche Sinnstiftung in der beginnenden Moderne und erschüttert das Vertrauen in diejenigen, die universale Welterklärungsmuster in die Wirklichkeit zu übertragen versuchen. Es bringt (zwei Jahre vor dem Ausbruch der Französischen Revolution) im historischen Gewand einen Orientierungsverlust in Schillers Gegenwart zum Ausdruck, in der sich die alteuropäische Ordnung chaotisch auflöst, ohne dass die weltimmanente Erfahrung von Ungewissheit noch einmal in einer heilsgeschichtlichen Gewissheit aufgefangen werden könnte.



# KLASSENSITZUNGEN

## Das Feste im Leben: Biomineralisation – Bioinspiration – Biomaterialien\*

PETER BEHRENS

Institut für Anorganische Chemie, Universität Hannover,  
Callinstraße 9, D-30167 Hannover  
E-mail: Peter.Behrens@mbox.acb.uni-hannover.de

### Einleitung

Entgegen der wörtlichen Bedeutung der Bezeichnung „Anorganische Chemie“ hat dieser Zweig der stofflichen Wissenschaft durchaus enge Beziehungen zur belebten Natur. Besonders evident werden diese durch die wichtigen Funktionen von Metallionen in Enzymen, z.B. dem Eisen im Hämoglobin, oder durch kürzlich entdeckte einfache Signalmoleküle wie das Stickstoffmonoxid, NO. Bei natürlich gebildeten anorganischen Festkörpern denkt man im allgemeinen an Gesteine und Minerale. Jedoch werden solche anorganischen Festkörper auch von Lebewesen gebildet. Dieses Phänomen bezeichnet man Biomineralisation. Lebewesen unterschiedlich hoher Entwicklungsstufen bilden Minerale aus, zum Zwecke des Schutzes, als Skelett, zur Unterstützung der Nahrungsaufnahme und für andere, speziellere Zwecke [1,2]. Die Abbildung 1 zeigt eine Reihe von Biomineralen, die in diesen Fällen alle aus amorphem Siliciumdioxid bestehen.

Die Biominerale sind als Komposit-Werkstoffe zu betrachten, die aus organischen und anorganischen Komponenten bestehen. Bei den organischen Bestandteilen handelt es sich meist um bioorganische Makromoleküle (Proteine, Polysaccharide und andere). Bei der Auswahl der anorganischen Materialien hat sich die Natur beschränkt: Größte Bedeutung haben Calciumcarbonate (Calcit, also Kalk, und Aragonit), amorphes Siliciumdioxid und Calciumphosphate (vor allem Apatit). Charakteristisch für die Biomaterialien ist ihr hierarchischer Strukturaufbau, der die präzise räumliche Organisation auf mehreren Längenskalen – von der atomaren Struktur bis hin zur Kristallmorphologie – beinhaltet. Selbstverständlich wurden die Biominerale im Laufe der Evolution für ihren jeweiligen Anwendungszweck optimiert. Spielen beispielsweise bei der „Anwendung“ im lebenden Organismus die mechanischen Eigenschaften des

---

\* Vortrag gehalten am 11.02.2005 in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

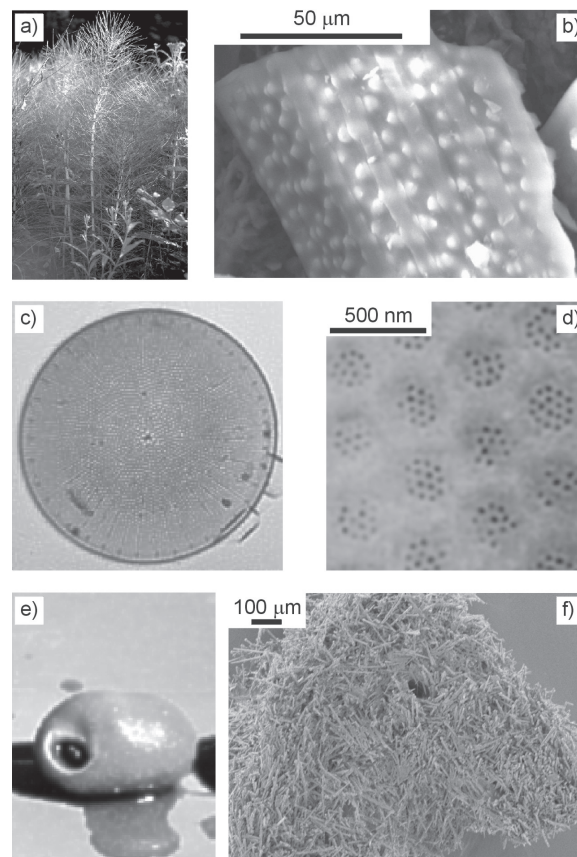


Abb. 1: Beispiele für Lebewesen (links), die Biominerale (rechts) aus amorphem Siliciumdioxid bilden; a) und b): Riesenschachtelhalm *Equisetum thelmateia*; c) und d) Kieselalge *Coscinodiscus sp.*; e) und f) Glasschwamm *Suberites domuncula*; b), d) und f): rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen.

Biomaterials eine Rolle, so ergeben sich aus der Kompositstruktur der verhältnismäßig „weichen“, aber zähen organischen Makromoleküle und der harten, aber bruchempfindlichen anorganischen Kristalle, hart-elastische Materialien mit besonderen Materialeigenschaften. Die Knochen der Wirbeltiere stellen in diesem Sinne eine Kompositstruktur aus Collagen und Apatit dar, die eine enorme Bruchzähigkeit aufweist. Erfolgt die Bildung des Knochens fehlerhaft, so führt dies zu charakteristischen Krankheitsbildern: Mangelnde Mineralisierung hat eine zu geringe Härte zur Folge (Rachitis, „Gummiknochen“), mangelnde Ausbildung der organischen Komponente eine zu geringe Elastizität („Glasknochen“).

Neben der Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften des fertig ausgebildeten Biominerals kommt den organischen Komponenten eine weitere wichtige Rolle zu. Auch wenn die natürlichen Prozesse der Bildung der Biominerale noch weitgehend unaufgeklärt und derzeit Gegenstand aktueller Forschung sind, so ist doch klar, dass ein Teil der organischen Bestandteile dazu dient, die Bildung der anorganischen Bestandteile zu kontrollieren und so die Konstruktion der hierarchischen Struktur zu steuern. Die wenigen Fälle, bei denen man mehr über diese Makromoleküle und ihre Rollen weiß, machen deutlich, dass diese einerseits starke Templatwirkungen bei der Entstehung der anorganischen Festkörper ausüben, andererseits aber auch das Wachstum von Kristallen begrenzen können. Darüber hinaus gibt es auch Hinweise auf die Funktion mancher Proteine als Enzyme, die die Spaltung von Vorläufermolekülen der anorganischen Verbindungen katalysieren. Die Biomineralisationsvorgänge laufen naturgemäß unter physiologischen Bedingungen ab, d.h. bei Temperaturen zwischen 4 und 37° C und in der Nähe des neutralen *pH*-Wertes [1,2].

Diese Eigenschaften – die strukturelle Kontrolle über mehrere Längenskalen bei der Entstehung von Festkörpern unter milden Bedingungen – machen Biomineralisationsprozesse zu einem interessanten Vorbild bei der Synthese von Materialien in Forschung und Anwendung. Das Ausmaß, in dem die Prinzipien der Biomineralisation befolgt werden, lässt eine generelle Einteilung der Ansätze zu, mit dem diese Prozesse nachvollzogen werden. In *bio-inspirierten Ansätzen* werden nur einige Aspekte übernommen; hierzu gehört z.B. die Abscheidung anorganischer Festkörper in Gegenwart organischer Makromoleküle, wobei weder die Zusammensetzung der organischen noch der anorganischen Bestandteile einen Bezug zur Natur haben muss. Dementsprechend erlauben solche Ansätze eine hohe Flexibilität bei der Materialzusammensetzung und die Erzeugung von Materialien mit einem breiten Spektrum von Eigenschaften, allerdings nutzen solche Verfahren naturgemäß nicht alle Vorteile der Biomineralisation aus. So finden sie beispielsweise meist bei höheren Temperaturen (erhöhter Energieaufwand) oder im nicht-biologischen Milieu (extreme *pH*-Werte mit der daraus folgenden Entsorgungsproblematik) statt. Dem gegenüber halten sich *biomimetische Verfahren* stärker an die Vorgaben der Natur und nutzen so das Potential des Vorbilds besser aus, z.B. durch Vermeidung eines hohen Energieaufwands und von Abfällen. Anzudenken sind schließlich auch „*biomineralisations-technologische Verfahren*“, die mit dem Repertoire der Biotechnologie in die natürlichen Mineralisationsvorgänge eingreifen und durch Genmanipulation die Erzeugung neuartiger Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften in lebenden Systemen ermöglichen sollten. Die *Bionik* schließlich macht sich nur generelle Eigenschaften des natürlichen Vorbilds zunutze und wertet diese als Designvorlagen für die Lösung konstruktions-technischer Probleme aus. Der Begriff des *Biomaterials* kennzeichnet künstlich hergestellte Werkstoffe, die von außen in lebende Systeme eingebracht werden, um dort spezifische Funktionen zu übernehmen, die aufgrund pathologischer

Erscheinungen vom Körper nicht mehr wahrgenommen werden können. Typische Beispiele sind Implantate im Zahn-, Knochen- und Gelenkbereich oder Stents, die zur Aufweitung und Offenhaltung von Gefäßen im Körper dienen [2].

Im folgenden werden einige dieser Verbindungsstellen zwischen der Anorganischen Materialchemie und der Biologie anhand von Beispielen aus eigenen Arbeiten näher erläutert. Wir beschränken uns daher aus chemischer Sicht auf Systeme, die als anorganische Komponente amorphes Siliciumdioxid aufweisen.

### Die Biomineralisation von Siliciumdioxid

Unter den Biomineralen ist das Siliciumdioxid einzigartig, da es als einziges stets nur in amorpher Form ausgebildet wird. Gegenüber kristallinen Festkörpern, wie Calciumcarbonaten und -phosphaten, deren Kristalle im allgemeinen gerade Flächen aufweisen, zeichnet sich diese ungeordnete Materialvariante durch eine nahezu beliebige Formbarkeit aus. Sie findet sich in niederen pflanzlichen Lebewesen, insbesondere den Kieselalgen, höheren Pflanzen wie Gräsern und Schachtelhalmen, und in niederen Tieren wie den Schwämmen.

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in Abbildung 2 zeigen den hierarchischen Strukturaufbau von Schwammskleren. Unsere Untersuchungen zum Aufbau dieser Nadelchen haben gezeigt, dass diese einen konzentrisch schichtförmigen Aufbau aufweisen. Dabei wechseln sich dickere Schichten aus amorphem Siliciumdioxid mit dünneren aus organischen Substanzen abwechseln. In der Mitte der Nadelchen befindet sich ein Kanal mit dreieckigem Querschnitt, der das sogenannte Zentralfilament enthält, das wiederum aus organischer Materie besteht. Aus diesem Zentralfilament konnte durch das Auflösen der Nadelchen ein Protein, das Silicatein, isoliert werden, das wichtige Funktionen bei der Bildung des Biominerals hat [3].

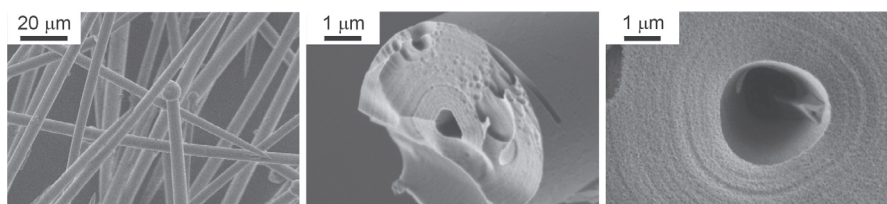


Abb. 2: Zum Aufbau der Schwammskleren von *Suberites domuncula*. Die Nadelchen bestehen aus konzentrisch angeordneten Wechsellagen aus amorphem Siliciumdioxid und organischen Schichten. In der Mitte befindet sich ein Zentralkanal, der das axiale Proteinfilament enthält.

### Bioinspirierte Synthesysteme

Kieselalgen (Diatomeen) beeindrucken durch die ästhetischen Ornamentierungen ihrer Schalen aus amorphem Siliciumdioxid (Abb. 3). Während diese Schalen diesen einzelligen Lebewesen Schutz vor Fraßfeinden, z.B. Ruderfußkrebse, bieten, sind die Poren von essentieller Bedeutung für den Stoffaustausch. Untersuchungen von Biochemikern haben gezeigt, dass die Ornamentierung auf den Kieselalgeschalen zumindest bei einfacheren Mustern auf Phänomene der Selbstorganisation zurückzuführen ist. Dabei spielen in der

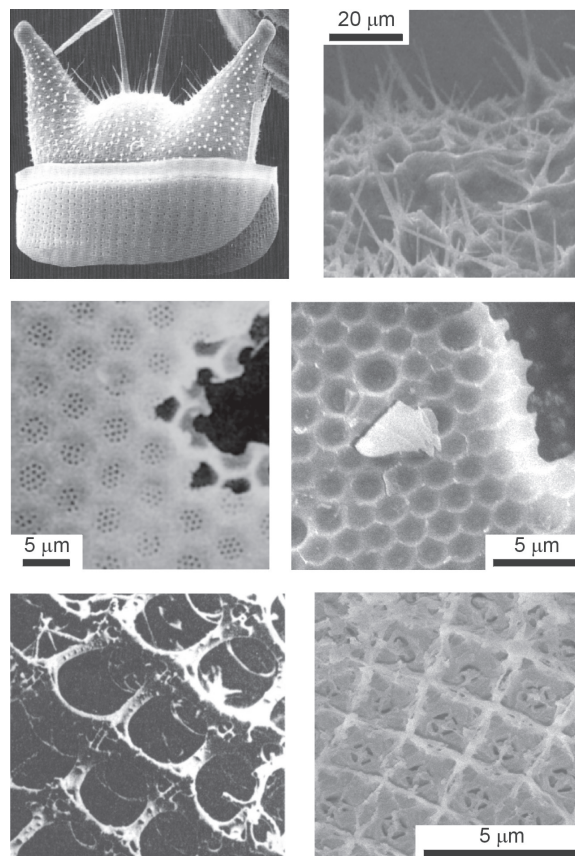


Abb. 3: Links: Natürliche Strukturen aus biogenem amorphem Siliciumdioxid; oben: Die Kieselalge *Odontella antediluviana*; Mitte: Die Kieselalge *Coscinodiscus sp.*; unten: ein Glasschwamm. Rechts: Mit einem bioinspirierten Synthesystem hergestellte Morphologien aus amorphem Siliciumdioxid.

Natur Polyamine und zwitterionische Peptide (Silaffine) eine wichtige Rolle [4,5].

In unserer Arbeitsgruppe gelang es uns, ein Synthesystem aufzubauen, das in der Lage ist, ähnliche Muster aus amorphem Siliciumdioxid aufzubauen, wie sie auf den Kieselalgenschalen zu finden sind. Hierzu lassen wir die Abscheidung des Siliciumdioxids in Gegenwart von Alkylglycosiden erfolgen. Alkylglycoside sind oberflächenaktive Moleküle, wie sie beispielsweise auch in Haarwaschmitteln Verwendung finden. In der Syntheselösung bilden diese Moleküle Micellen und Emulsionen aus, deren Strukturen dann durch das sich verfestigende Siliciumdioxid abgeprägt werden. Je nach den Reaktionsbedingungen bilden sich dabei hexagonale oder quadratische Muster oder auch Nadelchen aus (Abb. 3). Es ist bemerkenswert, dass ein so einfach aufgebautes Synthesystem (Alkylglycosid – Salzsäure – Siliciumdioxid) so komplexe Ornamente hervorbringen kann [6].

### **Biomaterialien**

An Biomaterialien werden verschiedene Anforderungen gestellt. Neben der generellen Forderung der Biokompatibilität (allgemeine Verträglichkeit mit dem biologischen System) sind dies unter anderem mechanische Stabilität (z.B. beim Ersatz von Knochen in belasteten Bereichen) oder häufig auch eine hohe Bioaktivität, d.h. eine aktive Förderung des Einwachsverhaltens im Körper. In manchen Fällen kommen spezielle Anforderungen hinzu. Wir beschäftigen uns in einem gemeinsam mit der Hals-Nasen-Ohren-Klinik der Medizinischen Hochschule Hannover und der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung (Braunschweig) betriebenen Projekt mit der Entwicklung von Prothesen für den Ersatz der Gehörknöchelchenkette im Mittelohr. Solche Prothesen werden verwendet, um bei Schädigungen der Gehörknöchelchen (Hammer, Amboss und Steigbügel) den mechanischen Kontakt zwischen Trommelfell und Innenohr wieder herzustellen. Bei dieser Anwendung sind die Schallleitungseigenschaften des Biomaterials von entscheidender Bedeutung für den Erfolg der Therapie. Bisher werden für Mittelohrprothesen meist metallische Werkstoffe wie Gold oder Titan eingesetzt. Die Schallleitungseigenschaften von Metallen unterscheiden sich allerdings deutlich von jenen von Kompositwerkstoffen wie dem Biomineral Knochen. Wir beabsichtigen daher, für diesen Zweck organisch-anorganische Biomaterialien einzusetzen. Auch wenn sich der komplexe hierarchische Aufbau des Knochens noch nicht synthetisch nachahmen lässt, so sollten die Schallleitungseigenschaften solcher Stoffe doch denen von natürlichen Knochen ähnlicher sein und zu einem gegenüber metallischen Prothesen verbesserten Hörerlebnis führen. Die Abbildung 4 zeigt ein solches synthetisches Komposit aus Chitosan und Apatit, das durch gemeinsame Fällung aus wässriger Lösung hergestellt wurde.



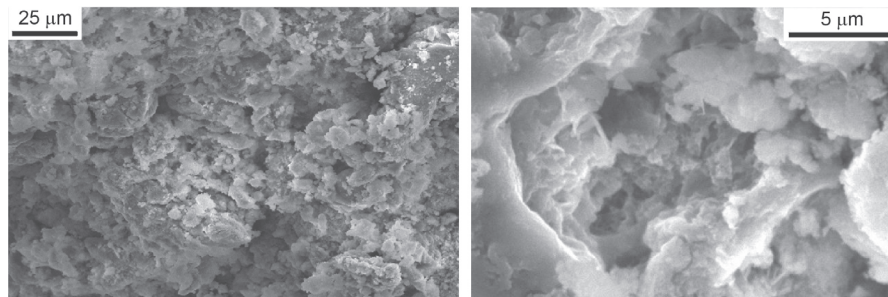


Abb. 4. Organisch-anorganische Composite aus Chitosan und Apatit als Knochenersatzstoffe. Die Bilder (zwei unterschiedliche Vergrößerungen) zeigen den nanostrukturierten Aufbau aus „kantigen“ Apatitkristallen und „wolkigen“ Chitosanstrukturen.

Chitosan ist ein biokompatibles Polysaccharid. Wichtig ist, dass die organische und die anorganische Phase wie im natürlichen Knochen auf der Nanometerskala miteinander vermengt sind. Die Leistungsfähigkeit solcher Chitosan-Apatit-Composite erweist sich bei audiologischen Messungen als leicht verbessert gegenüber den metallischen Prothesen [7].

### Danksagung

Ich danke den Mitarbeitern meiner Arbeitsgruppe für ihren vorbildlichen Einsatz bei der Forschung im Grenzgebiet zwischen anorganischen Festkörpern und der belebten Natur. Den Kooperationspartnern vom Institut für Technische Chemie der Technischen Universität Braunschweig (AK Prof. Menzel), von der Hals-Nasen-Ohren-Klinik der Medizinischen Hochschule Hannover (Prof. Lenarz, Dr. Stieve, Dipl.-Ing Hamidreza Mojallal) und von der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung Braunschweig (Dr. Müller) danke ich für viele interessante Diskussionen. Die hier vorgestellten Arbeiten werden von der DFG im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1117 (Prinzipien der Biomineralisation) und des Sonderforschungsbereiches 599 (Resorbierbare und dauerhafte Implantate) gefördert.

### Literatur

- [1] BAEUERLEIN, E.: *Biomineralization*, 2.Auflage 2004, Wiley-VCH, Weinheim.
- [2] EPPL, M.: *Biomaterialien und Biomineralisation*, 2003, Teubner, Wiesbaden.
- [3] SHIMIZU, K., J. CHA, G.D. STUCKY & D.E. MORSE: Proc. Natl. Acad. Sci. 95 (1998) 6234.

- [4] KRÖGER, N., R. DEUTZMANN, C. BERGSDORF & M. SUMPER: Proc. Natl. Acad. Sci. 97 (2000) 14133, M. Sumper, Science 95 (2002) 2430.
- [5] MENZEL, H., S. HORSTMANN, P. BEHRENS, P. BÄRNREUTHER, I. KRUEGER & M. JAHNS: Chem. Commun. (2003) 2994.
- [6] BEHRENS, P. & G. SCHECHNER: *Proceedings Silica 2001*, Mulhouse 2001.
- [7] KRUEGER, I., P.P. MÜLLER, H., MOJALLAL, M. STIEVE, T. LENARZ & P. BEHRENS: Eur. Cells Mater. 7 (2004) 60.



## **Umweltverträgliche Grundwasserbewirtschaftung auf den Nordsee-Inseln Steuerung durch Vegetationsmonitoring<sup>\*,1</sup>**

RICHARD POTT

Institut für Geobotanik der Universität Hannover  
Nienburger Straße 17, D-30167 Hannover  
e-mail: Pott@geobotanik.uni-hannover.de

### **Abstract**

Im Spannungsfeld zwischen Grundwassernutzung, Naturschutz und Tourismus wurden umweltverträgliche Steuerungsmechanismen für die Wassergewinnung auf Norderney und Langeoog aufgrund vegetationskundlicher und hydrogeologischer Daten entwickelt. Norderney wurde als mehr städtisch geprägte Insel, Langeoog als Insel mit dörflichem Charakter ausgewählt. Praktikable und übertragbare Handlungsanweisungen für die Wassermeister auf den Inseln und die Naturschutzbehörden wurden erarbeitet. Es wird in diesem Vortrag gezeigt, dass Pflanzengesellschaften insbesondere in den Dünentälern als geeignete Bioindikatoren für die Erhaltung der Qualität und Quantität des Grundwassers Anwendung finden können.

Die Süßwasservorkommen der Inseln entstehen durch in Sand versickernde Niederschläge. Das Süßwasser schwimmt, bedingt durch dessen geringere Dichte, auf dem Salzwasser. Die Grenzfläche zwischen Süß- und Salzwasser sowie die Grundwasseroberfläche im Inselfand sind stabil und annähernd parabolisch geformt. Die süßen Grundwasservorkommen heißen deshalb Süßwasserlinsen. Diffusion und hydromechanische Dispersion steuern die so genannte Nimitzu-Strömung in der Grenzschicht. Norderney verfügt über eine zusammenhängende Süßwasserlinse mit einer Mächtigkeit von 85 m und einer Ausdehnung von etwa 5 km<sup>2</sup>. Auf Langeoog ist hingegen die Süßwasserlinse in drei Segmente aufgeteilt.

---

\* Vortrag gehalten am 10.06.2005 in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

<sup>1</sup> Auszug als Vortrag einer Veröffentlichung von PETERSEN, J., R. POTT & O. RICHTER (2001): Dünentäler – Ein gefährdeter Lebensraum im Interessenkonflikt zwischen Naturschutz und Grundwasserbewirtschaftung, Zbl. Geol. Paläont., Teil I, Heft ½, 93-110, Stuttgart, Februar 2001.

Pflanzengesellschaften der Dünen (Xeroserie) und der Dünentäler (Hygroserie) wurden hinsichtlich Art, Ausdehnung, Bedeckungsgrad und Lage erfasst. Für die Grundwasser-Einzugsgebiete und von der Grundwassergewinnung unbeeinflusste Referenzgebiete wurden charakteristische Pflanzengesellschaften ausgewählt und Feuchteklassen ermittelt. Schwerpunktmäßig wurden Braunsseggensumpf (*Caricetum trinervi-nigrae*), Feuchtheide (*Empetro-Ericetum*), Krähenbeerenheide (*Hieracio-Empetretum*), Birkenwald, Trockenrasen und andere untersucht, Grundwasserstände gemessen sowie räumlich hoch aufgelöste Vegetationskarten angefertigt. Seit 1949 ist eine Zunahme der Feuchtheide festzustellen, allerdings hauptsächlich auf artenarme Vegetationstypen beschränkt. Für den Bereich der heutigen Grundwassergewinnung können nach dieser Bioindikation keine negativen Auswirkungen der intensiven Grundwasserförderung festgestellt werden. Gleichwohl gehören die feuchten Dünentäler zu den am meisten bedrohten Biototypen.

## 1. Einleitung

Im Nordseeküstenbereich sind das Wattenmeer und seine Inseln ein weltweit einmaliger Lebensraum und eines der letzten naturnahen Ökosysteme Mitteleuropas. Auf Grund ihrer naturräumlichen Sonderstellung galt den Inseln des Wattenmeeres schon seit jeher ein besonderes Interesse.

Dieses bezieht sich zum einen auf den Fremdenverkehr, denn diese noch weitgehend naturnahe Küstenlandschaft war und ist die Basis für den Tourismus, der gleichzeitig die wichtigste Erwerbsquelle für die Küstenbevölkerung darstellt. Die mit dem Tourismus verbundene Notwendigkeit der Wasserwirtschaft, Trinkwasser in jahreszeitlich unterschiedlicher Intensität bereitzustellen, bedingt jedoch eine unterschiedliche Beanspruchung der Ressource Grundwasser, so daß es bei übermäßiger Grundwasserentnahme zur Gefährdung des Ökosystems Dünen- und vor allem ihrer grundwasserabhängigen Vegetation kommt.

Zum anderen gehören die Ostfriesischen Wattenmeer-Inseln zum Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer. Aufgabe des Nationalparks ist es vor allem, der Erhaltung eines artenreichen Pflanzen- und Tierbestandes zu dienen und nur geringe anthropogene Beeinflussung zuzulassen. Um Beeinflussungen bewerten zu können, ist es wichtig, eine umfassende Kenntnis über das Vorkommen und den Zustand der grundwasserabhängigen Vegetation zu haben. Denn bei den Vegetationseinheiten der feuchten Dünentäler (= Hygroserie) handelt es sich um die am meisten bedrohten Pflanzengesellschaften der Küstenvegetation und dieser Lebensraum wird von „von der Vernichtung bedrohten oder stark gefährdeten“ Biototypen geprägt (s. POTT 1996, 2003, 2005).

Aus diesen Gründen ist im Jahr 1999 ein neues interdisziplinäres Forschungsprojekt mit dem Titel *„Umweltverträgliche Grundwasserbewirtschaftung in hydro-geolo-*

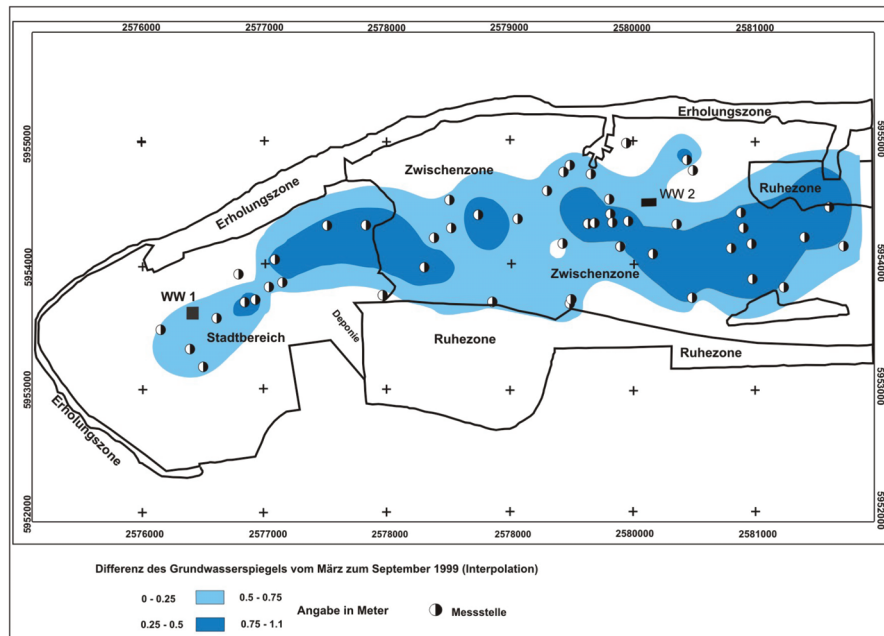


Abb. 1: Schutzzonen des Nationalparks Niedersächsisches Wattenmeer, verschnitten mit einer Darstellung der Absenkung des Grundwasserspiegels von März bis September 1999. (Datengrundlage beruht auf einer Interpolation von Stichtagsmessungen der Stadtwerke Norderney).

gisch und ökologisch sensiblen Bereichen der Nordseeküste" gestartet. Projektpartner waren hierbei Hydrogeologen (Prof. Dr. Joachim Wolff, TU Braunschweig), Pflanzenökologen (Prof. Dr. Peter Janiesch, Univ. Oldenburg), Sozioökonomien (Prof. Dr. Georgios Magoulas, Univ. Hannover) und wir Geobotaniker von der Universität Hannover. Ziel war es, der Wasserwirtschaft eine Art „Wegweiser“ für ein umweltverträgliches Grundwassermanagement zu liefern.

## 2. Untersuchungsgebiet

Die sich verschärfende ökologische Problematik bei der Grundwasserbewirtschaftung im Spannungsfeld zwischen Naturschutz und Wassergewinnung und deren Auswirkungen kann auf den Ostfriesischen Inseln geradezu modellhaft untersucht werden: Mit dem städtisch geprägten **Norderney** und dem eher dörflich strukturierten **Langeoog** wurden zwei in ihrem Wirtschafts- und Bevölkerungsgefüge unterschiedliche Inseln als Untersuchungsraum ausgewählt (Abb. 1-3).



Abb. 2: Lage und Übersicht des Untersuchungsgebietes im niederländischen, deutschen und dänischen Wattenmeer.



Abb. 3: Dünenatal Bakenlegde auf Norderney. Im Vordergrund Braunseggensumpf (*Caricetum trinervi-nigrae*), *Salix arenaria*-Gebüsch und Birkenwald (*Betula pubescens*-Gesellschaft) im Hintergrund.



## 2.1 Arbeitsschritte und erste Ergebnisse

Strategien zur umweltverträglichen Grundwasserbewirtschaftung im Küstenbereich wurden im Rahmen dieses interdisziplinären Projektes erstmals erarbeitet. Unsere ersten Arbeitsschritte und die ersten Ergebnisse der Arbeitsgruppe Geobotanik lassen sich in vier Abschnitte gliedern:

## 2.2 Auswahl von „Indikator“-Vegetationseinheiten und Installation der Beobachtungsflächen in Verbindung mit Grundwasser-Meßpegeln

Für die Auswahl geeigneter Indikator-Vegetationseinheiten diente u.a. die Einschätzung des Feuchtegrades der Pflanzengesellschaften anhand der Ellenberg'schen Feuchtezahlen. Hierbei handelt es sich um empirisch erhobene Zeigerzahlen mit hohem Indikationswert, die im Laufe der Zeit durch Messungen verifiziert wurden. Nach Heinz ELLENBERG et al. (1992) ist die Feuchtezahl der am besten gesicherte Zeigerwert, dem zahlreiche Untersuchungen und Beobachtungen über Beziehungen zwischen Pflanzen und Grundwasserständen zu Grunde liegen, so daß eine relativ gute Abschätzung der Ansprüche der Pflanzengesellschaften möglich ist (s. Abb. 4).

In einem Sukzessionsschema der Dünenal-Vegetation von den Wattenmeer-Inseln werden solche Unterschiede verdeutlicht (s. Abb. 5). Neben dem Feuchte-

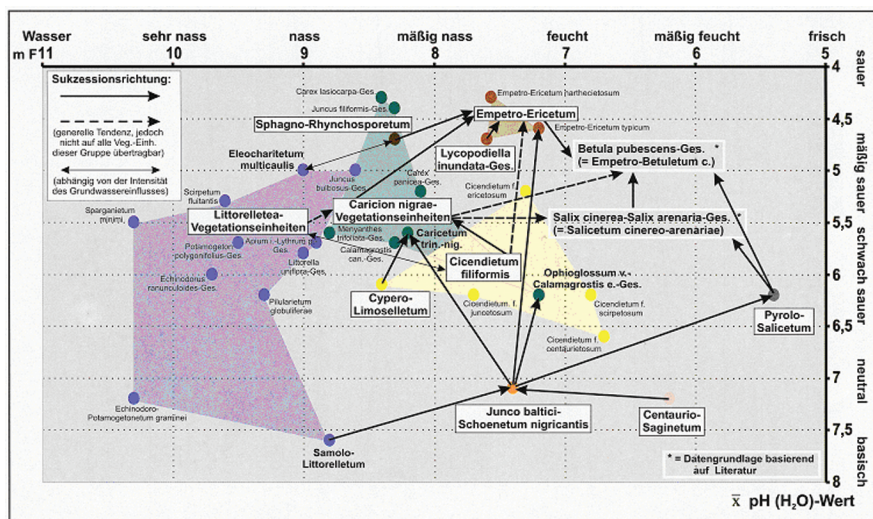


Abb. 4: Sukzessionsschema der Dünenal-Vegetation auf den Wattenmeer-Inseln.

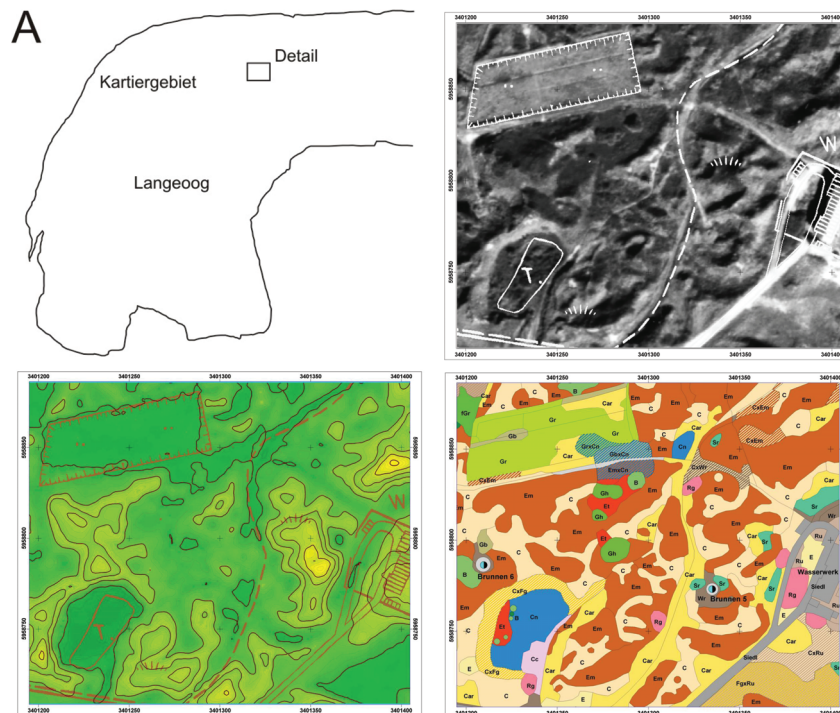


Abb. 5: Datengrundlagen und Ergebnisse der Vegetationskartierung des Grundwasser-Einzugsgebietes auf der Insel Langeoog (A: Übersicht des Kartierungsgebietes, B: Verschneidung von Deutscher Grundkarte mit Colour-Infrarot-Luftbild, C: Verschneidung von Deutscher Grundkarte mit Höhenmodell, D: Vegetationskarte im Detail).

grad ist die Bodenazidität ein weiterer entscheidender Faktor in diesem Standortgefüge. Diese Phänomene basieren auf der Datengrundlage von 719 Bodenproben aller 17 Wattenmeer-Inseln, von den Niederlanden bis nach Dänemark, sowie der Berechnung mittlerer Feuchtezahlen von insgesamt 2775 Vegetationsaufnahmen, welche Jörg PETERSEN in seiner Dissertation im Jahre 2000 erhoben hat. So wird in dem Ökogramm die natürliche Vegetationsentwicklung innerhalb der Hygroserie aufgezeigt (s. Abb. 4). Da grundsätzlich ein Großteil der Grundwasser-Einzugsgebiete der Nordseeinseln mit Dünen-Vegetation (Xeroserie = Pflanzengesellschaften der trockenen Dünen) bewachsen ist, werden neben den selteneren Pflanzengesellschaften der Dünentäler auch spezielle „Indikator“-Einheiten der trockenen Dünen ausgewählt.

Die zu untersuchenden Vegetationseinheiten wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Sie sollen charakteristisch für die Grundwasser-Einzugsgebiete sein.
- Sie sollen den Hauptanteil der Vegetation der Grundwasser-Einzugsgebiete bilden.
- Sie sollen sich in ihrer Abhängigkeit vom Grundwasser unterscheiden.
- Sie sollen sowohl im Grundwasser-Einzugsgebiet als auch in von der Grundwasser-Gewinnung unbeeinflussten Referenzgebieten der Inseln vorkommen.

Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Kriterien eignen sich insgesamt fünf Vegetationseinheiten, die auch den Schwerpunkt unserer Untersuchungen bilden:

1. Brauseggensumpf (*Caricetum trinervi-nigrae*)
2. Feuchtheide (*Empetro-Ericetum*)
3. Birkenwald (*Betula pubescens*-Gesellschaft)
4. Trockenheide (*Hieracio-Empetretum*)
5. Trockenrasen (Corynephorion-Gesellschaften, vor allem das *Violo-Corynephoretum*)

Auf den Wuchsgebieten dieser Pflanzengesellschaften der Inseln Norderney und Langeoog wurden insgesamt 47 Dauerbeobachtungsflächen mit Grundwasser-Meßpegeln installiert.

### **2.3 Erfassung des „status quo“ der Vegetation von Grundwasser-Einzugsgebieten der Wasserwerke Norderney und Langeoog sowie ein GIS-gestützter Vergleich mit älteren und historischen Vegetationskarten**

Die Grundwasser-Einzugsgebiete auf den Inseln Norderney und Langeoog wurden pflanzensoziologisch im Maßstab 1:3.000 kartiert. Grundlage der Kartierungen war immer eine Erfassung der vorkommenden Pflanzengesellschaften durch Vegetationsaufnahmen. Um eine hochauflösende und damit genaue Wiedergabe aller Gebiete zu erreichen, wurden EDV-gestützte Darstellungs- und Auswertetechniken mit traditioneller Kartiertechnik verknüpft. Mittels des Einsatzes von GIS (ArcView) war es ferner möglich, verschiedene Datensätze miteinander zu verschneiden. Das sind folgende Parameter (s. Abb. 5):

- Digitale Grundkarte (1:3.000)
- Digitale Luftbilder: Schwarz-Weiß und Colour-Infrarot
- Hochauflösendes digitales Höhenmodell (Grundlage war eine Laserscann-Befliegung, die eine Auflösung von 1 m ermöglicht.)
- Digitalisierte Karten bisher vorliegender

Vegetationskartierungen (z.B. R. TÜXEN & NEUMANN 1949 und A. FROMKE 1996 für Langeoog).

Durch die Verbindung dieser digitalen Kartiervorlagen mit unseren Geländedaten konnten hochauflösende und genaue Vegetationskarten angefertigt werden (s. Abb. 6). Dieser Istzustand der Vegetation eines Grundwasser-Einzugsgebietes schafft somit eine aktuelle Grundlage für die genaue Lokalisierung und Differenzierung von grundwasserabhängiger und -unabhängiger Vegetation. So wird damit die Basis für ein „Wegweisersystem“ des umweltverträglichen Grundwassermanagements geschaffen und es entsteht in einer Verbindung mit den Dauerbeobachtungsflächen und den Grundwasser-Meßpegeln ein zukunftsorientiertes Monitoringsystem.

Bei der Interpretation von Vegetationsveränderungen war allerdings zu beachten, daß es sich in der Regel um natürliche Sukzessionen handelt, die durch Veränderungen der Standortbedingungen wie Versauerung, Entsalzung und Anreicherung an organischer Substanz verursacht werden (s. Abb. 4). Es ist aber auch zu berücksichtigen, daß anthropogene Einflüsse, beispielsweise Grundwasserabsenkungen durch intensive Grundwasserförderung, die natürlichen Sukzessionsprozesse verändern oder gar zum Verlust von Pflanzengesellschaften der feuchten Dünentäler und somit entsprechend zum Auftreten von Vegetationseinheiten der trockenen Dünen oder anderen Vegetationsbeständen führen können.

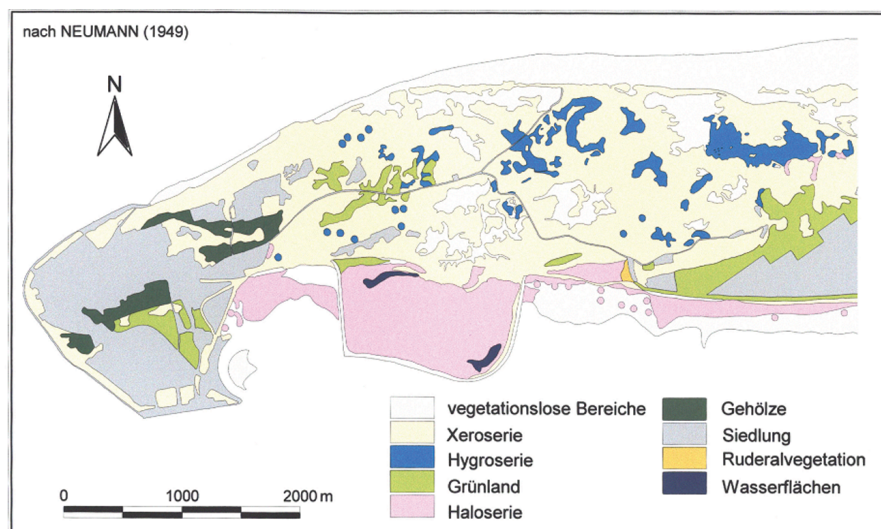
Bei der Interpretation der Genese des Istzustandes sind vor allem ältere bzw. historische Vegetationskarten hilfreich. Für die Insel Norderney liegen Vegetationskarten der Jahre 1949 von R. TÜXEN & NEUMANN sowie 1990 von C. HOBOHM (1993) und eine aktuelle Vegetationserfassung von Dirk HAHN (2005) vor. Diese Vegetationskarten wurden digitalisiert, georeferenziert, mittels GIS verschnitten und anhand der Daten wurde eine Flächenberechnung durchgeführt.

Bei der Interpretation der aktuellen und historischen Vegetationsdaten konnten ferner Angaben zur Gesamtförderung der Wasserwerke Norderney verwendet werden, die von A. MÜLLER & J. WOLFF (1998) erhoben worden sind. Die Stadtwerke Norderney GmbH fördern derzeit aus zwei Wasserwerken (Wasserwerke „Ort“ und „Weiße Düne“ bzw. Wasserwerke I und II) ca. 1 Million m<sup>3</sup>/a Grundwasser. Das Wasserwerk „Ort“ wurde Ende des 19. Jahrhunderts in Betrieb genommen. Die Förderung betrug Anfang des 20. Jahrhunderts 150.000 bis 300.000 m<sup>3</sup>/a, steigerte sich bis 1958 auf ca. 500.000 m<sup>3</sup>/a und wurde dann wieder auf 150.000 m<sup>3</sup>/a (1997) reduziert. Das Wasserwerk „Weiße Düne“ wurde im Jahr 1959 in Betrieb genommen und erreichte 1960 eine Förderung von knapp 300.000 m<sup>3</sup>/a. Problematisch für die Vegetation der feuchten Dünentäler war sicherlich die deutliche Steigerung auf ca. 800.000 m<sup>3</sup>/a Ende der siebziger Jahre. Leider liegen aus diesen interessanten Zeitabschnitten keine Vegetationskartierungen vor, um Veränderungen der Vegetation zu dokumentieren. Zu be-



denken ist hierbei, daß gerade in den Sommermonaten, also während der optimalen Vegetationsperiode, bis zu zwei Drittel der Gesamtförderung entnommen werden (s. R. NEUHAUS & J. PETERSEN 1999). Im Bereich des Wasserwerkes „Weiße Düne“ ergibt sich laut A. MÜLLER & J. WOLFF (1998) für die Jahre 1988 und 1991 sogar eine Grundwasserabsenkung von ca. 0,40 bis 1,40 m. Eine Absenkung dieser Größenordnung hatte mit großer Wahrscheinlichkeit negativen Einfluß auf die grundwasserabhängigen Pflanzengesellschaften der feuchten Dünentäler. Die intensiven Grundwasserförderungen des Wasserwerkes „Weiße Düne“ betreffen vor allem das nahegelegene Dünenal Bakenlegde. Von großer Bedeutung ist hierbei, daß einige Dünentäler im Bereich des Wasserwerkes „Weiße Düne“ in der Schutzzone I (= Ruhezone) des Nationalparks Niedersächsisches Wattenmeer liegen und sich hier die empfindlichsten Landschaftsteile, Pflanzen- und Tierarten des Nationalparks, befinden (s. Abb. 1 und HELBING 1991, Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer 1992, POTT. & PETERS 1999). Die Abbildung 1 verdeutlicht weiterhin, daß auch in diesem Gebiet deutliche Grundwasserabsenkungen vorliegen.

Der Vergleich der Vegetationskarten der Jahre 1949, 1990 und 2000 des Grundwasser-Einzugsgebietes zeigt, daß insgesamt jedoch die Ausdehnung der Vegetationseinheiten der Hygroserie zugenommen hat. Allerdings beschränkt sich die Zunahme zum einen auf das neue Zuwachsgebiet „Südstrandpolder“, wo sich Salzwiesenbereiche zu Feuchtbiotopen entwickelt haben (s. Abb. 6) und zum anderen hauptsächlich auf artenarme, auf den Inseln allgemein verbreitete Vegetationstypen.



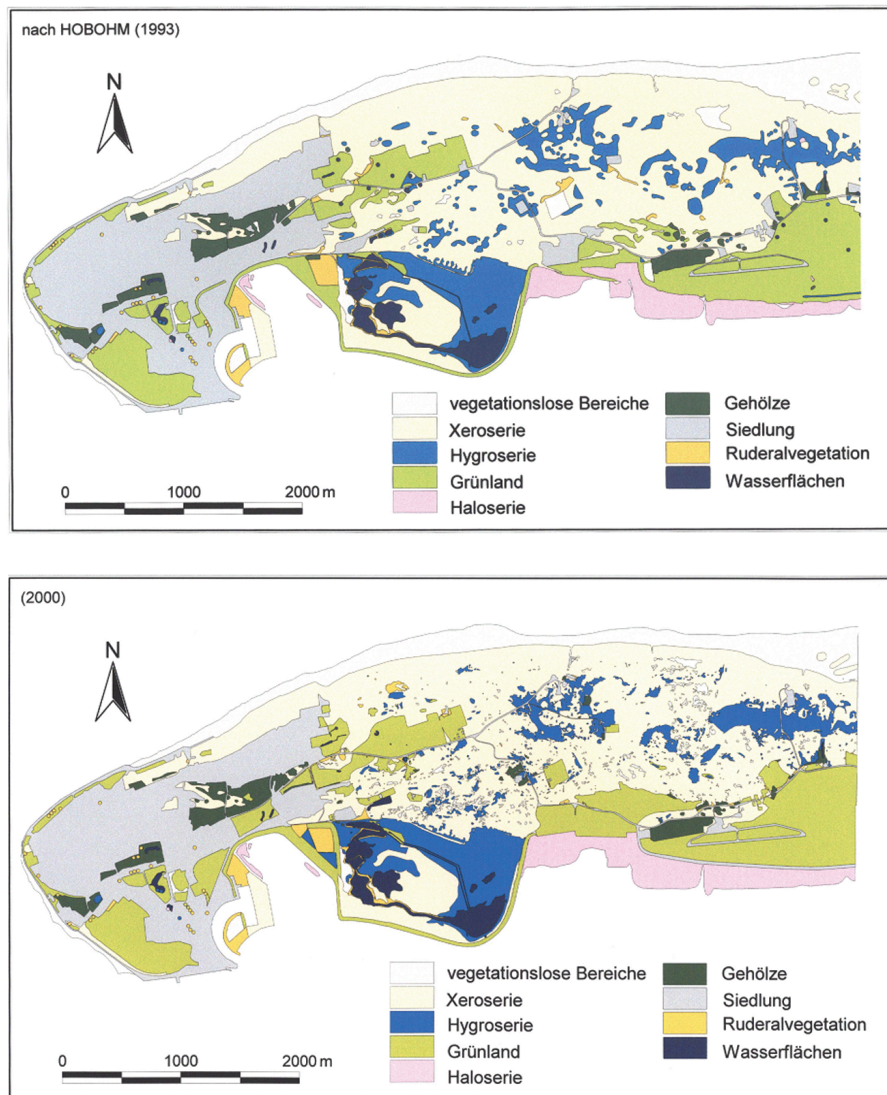


Abb. 6: Vegetationskarten der Insel Norderney von 1949 (TÜXEN & NEUMANN), 1990 (HOBOM 1993) und 2005 (HAHN).

Eine detaillierte Analyse aller vorkommenden Pflanzengesellschaften der Hygroserie verdeutlicht ferner, daß die lokale Zunahme auf Norderney zum größten Teil auf Ausbreitung des *Scirpo-Phragmitetum* (Röhricht), der *Betula*

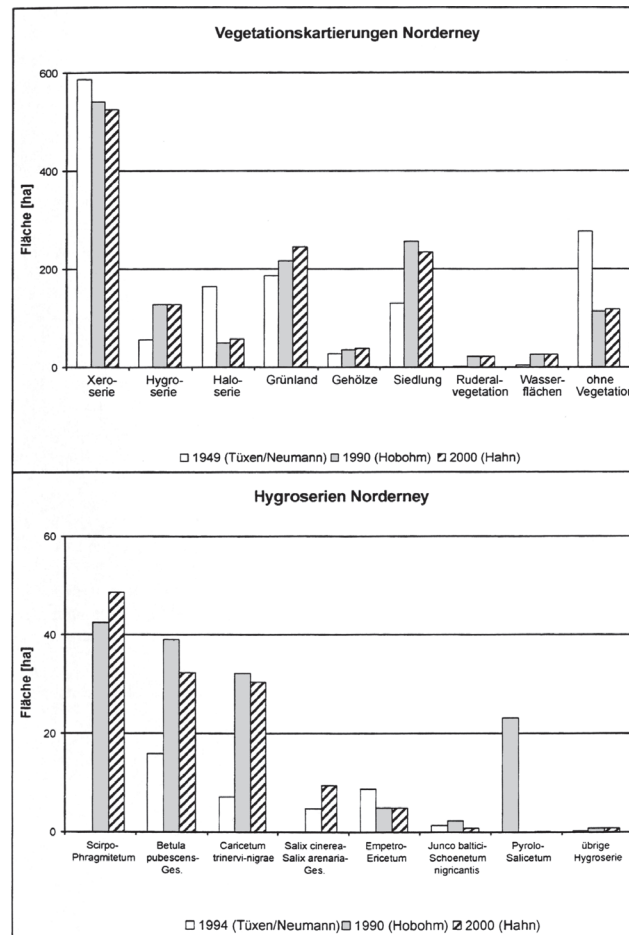


Abb. 7: Flächenanteile sämtlicher Biotoptypen und der Hygroserie im Detail der Vegetationskarten von Norderney (s. Abb. 5) aus den Jahren 1949 (TÜXEN & NEUMANN), 1990 (HOBHOM 1993) und 2000 (HAHN).

*pubescens*-Gesellschaft (Birkenwald), des *Caricetum trinervi-nigrae* (Braunseggenumpf) und der *Salix cinerea-Salix repens*-Gesellschaft (Weiden-Gebüsch) zurückzuführen ist (s. Abb. 7). Da die Bestände des *Scirpo-Phragmitetum* und der *Salix cinerea-Salix repens*-Gesellschaft jedoch nahezu ausschließlich auf dem „Südstrandpolder“ vorkommen und dieser Bereich weitestgehend außerhalb des Grundwasser-Einzugsgebietes liegt (s. Abb. 1), sind sie für diesen Vergleich verhältnismäßig bedeutungslos. Die Zunahme des Braunseggenumpfes

und vor allem des Birkenwaldes läßt sich aber auch durch die natürliche Sukzession in feuchten Dünentälern erklären, wobei der Birkenwald innerhalb der Sukzessionsreihe der Hygroserie eindeutig als Schlußgesellschaft zu bewerten ist (s. Abb. 4 u. 6, POTT 1995, PETERSEN 2000). Am Beispiel des Grundwasser-Einzugsgebietes und vor allem der Bakenlegde deutet sich an, daß konkurrenzstarke, artenarme Birkenwälder durch Grundwasserabsenkungen sogar gefördert worden sind. Von Bedeutung hierbei ist, daß die Birke dort, wo sie einmal Fuß gefaßt hat, die Standortverhältnisse zu ihren Gunsten verändert. Denn sie entzieht dem Boden verhältnismäßig viel Grundwasser und verschafft sich dadurch sukzessive einen Konkurrenzvorteil gegenüber den Nässe und Feuchtigkeit bevorzugenden Arten und entsprechenden Pflanzengesellschaften der Hygroserie. Für die Ausbreitung des Birken-Buschwaldes haben sich wahrscheinlich auch partielle Birkenpflanzungen fördernd ausgewirkt (vgl. HOBOHM 1993, PETERS & POTT 1999).

### **3. Erste Grundwasser-Schwellenwerte der ausgewählten Vegetationseinheiten**

Das hydrologische System der Süßwasserlinsen auf den Nordseeinseln und das Vorkommen von Pflanzengesellschaften der feuchten Dünentäler stehen in direkter Abhängigkeit. Für das Verständnis dieser oft komplizierten Sukzessionsbedingungen in Dünentälern ist die Berücksichtigung von Grundwasserstandsschwankungen von großer Bedeutung. Änderungen des Grundwasserstandes können auch bei Ausbreitung oder Zurückweichen der Küstenlinie an seeseitigen Inselabschnitten auftreten. Infolge der Bildung neuer Dünenreihen kann es zum Anstieg des Grundwasserstandes in den Dünentälern und damit zur Versumpfung kommen. Kurzfristige Schwankungen beispielsweise durch ergiebige Niederschläge haben hierbei einen geringeren Einfluß als die jahreszeitlichen Schwankungen.

Grundwasserabsenkungen wie sie bei der Förderung von Trinkwasser zwangsläufig entstehen, müssen deshalb in einem kontrollierten Toleranzbereich gehalten werden, gerade wenn sie Feuchtgebiete von Naturschutzgebieten bzw. Nationalparks betreffen. Zur Regelung dieser Eingriffe in Dünen und Dünentallandschaften sollen aus diesen Gründen vegetationspezifische Grundwasser-Kenndaten als eine Art Frühwarnsystem entwickelt werden. Wichtige Eckdaten für die Charakterisierung der Grundwasserabhängigkeit verschiedener Pflanzengesellschaften sind (s. Abb. 8):

- Der absolute Minimumwert bzw. der extreme Tiefstand während und nach einer Trockenperiode
- Der absolute Maximumwert bzw. der extreme Hochstand während und nach einer Feuchtperiode in Kombination mit der Dauer der Überflutung [Monate]

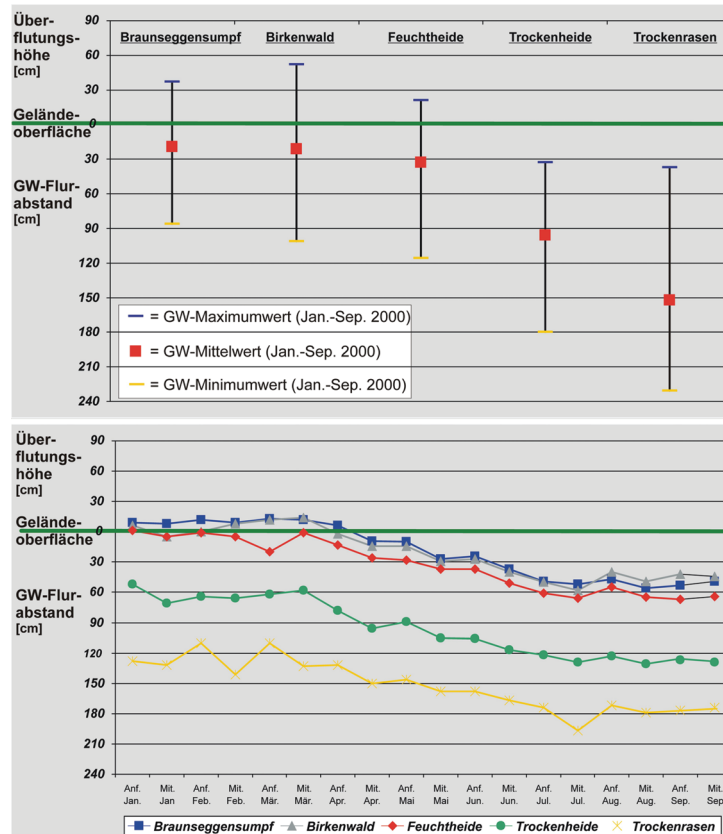


Abb. 8: Erste Grundwasser-Schwellenwerte und -Ganglinien charakteristischer Vegetationseinheiten der Dünen und Dünentäler auf den Wattenmeer-Inseln.

- Ein „repräsentativer“ mittlerer Grundwasserstand
- Eine „repräsentative“ mittlere Grundwasser-Ganglinie.

Ähnliche Angaben finden sich in TÜXEN (1954), NIEMANN (1963, 1973), KLÖTZLI (1969), GROOTJANS et al. (1991), DVWK(1996) und LAMMERTS (1999).

Der in Abb. 8 dargestellten ersten Ergebnisse liegen die Meßdaten von 38 Grundwasser-Meßpegeln zugrunde. Die Installation der Meßpegel war Ende 1999 abgeschlossen, so daß Grundwasser-Meßdaten ab Januar 2000 vorliegen. Ihre Datenerhebung erfolgt jeweils am Anfang und in der Mitte eines Monats. Zusätzlich sollen die jahrelangen Meßdaten der jeweiligen Wasserwerke ausgewertet werden. Der Minimumwert des Grundwasserstandes ist für die Charak-

terisierung eines Vegetationstypes von großer Bedeutung, jedoch kein erstrebenswerter Richtwert für das umweltverträgliche Grundwassermanagement. Für den Maximumwert ist in erster Linie die Dauer der Überflutung wichtig, weniger der absolute Wert. Dieser ist allerdings ein Schlüsselfaktor der Vegetationszusammensetzung, also eine Wuchsvoraussetzung der jeweiligen Pflanzengesellschaft. Der mittlere Grundwasserstand bzw. ein Schwankungsbereich um diesen Wert ist als Kontrollwert der Grundwasserförderung anzustreben, wobei die charakteristischen mittleren Grundwasser-Ganglinien zu berücksichtigen sind.

Abbildung 8 zeigt die ersten Ergebnisse zur Bestimmung der Grundwasser-Schwellenwerte der fünf ausgewählten Vegetationseinheiten. Auffallend ist dabei die deutliche Differenzierung der Grundwasser-Eckdaten zwischen Pflanzengesellschaften der Dünen und Dünentäler. Während sich die Vegetationseinheiten der Hygroserie nur gering unterscheiden, liegt innerhalb der Xeroserie für die Trockenheide (*Hieracio-Empetretum*) und den Trockenrasen (u.a. *Violo-Corynephorum*) eine stärkere Abstufung vor. Für den Braunseggensumpf (*Caricetum trinervi-nigrae*), den Birkenwald (*Betula pubescens*-Gesellschaft) und die Feuchtheide (*Empetro-Ericetum*) ergibt sich eine maximale Überflutungshöhe im Bereich zwischen 20 und 50 cm. Entscheidend ist hierbei weniger die Überflutungshöhe, sondern vielmehr die anhaltende Überflutungsdauer. Der Minimumwert dieser Vegetationseinheiten schwankt um einen Grundwasserflurabstand von ca. 90 cm (86 bis 116 cm). Für solche Pflanzengesellschaften lässt sich also eine Amplitude der Grundwasserstände von > 0 bis 90 cm Flurabstand aufführen. Der mittlere Grundwasserflurabstand liegt für alle drei Pflanzengesellschaften bei ca. 30 cm. Angaben zur Überflutungsdauer können auf Grund der bisher vorliegenden Daten (Jan.-Sep. 2000) noch nicht vorgenommen werden. Um eine feinere Differenzierung der Pflanzengesellschaften der feuchten Dünentäler zu erlangen, kann aber eine Unterteilung in eine feuchte und trockene Ausbildung der jeweiligen Vegetationseinheiten erfolgen. Vom DVWK (1996) wird eine Klassifizierung überwiegend grundwasserbeeinflusster Vegetationstypen für den Festlandsbereich angegeben. Hier liegen durchaus vergleichbare Werte vor, d.h. für diese drei Pflanzengesellschaften der Hygroserie werden ein Maximumwert > 0 und ein Minimumwert mit Grundwasserflurabständen im Bereich von 60 bis 100 cm aufgeführt. Es wird jedoch kein mittlerer Grundwasserstand angegeben, sondern nur ein mittlerer Schwankungsbereich. Dieses Phänomen wird mit dem vorliegenden sehr heterogenen Datenmaterial begründet, wobei sich nach Angaben des DVWK (1996) der mittlere Grundwasserstand innerhalb dieses Bereiches befinden soll. Für eine Analyse der charakteristischen Grundwasserdaten von Pflanzengesellschaften muß natürlich der jahreszeitliche Grundwasserstandsverlauf ermittelt werden, der in Form so genannter Grundwasser-Ganglinien dargestellt wird (s. Abb. 8). Nur die Kombination dieser Eckwerte ermöglicht es, durch Auswertung von zumindest mehrjährigen Meßreihen sowohl naturschutz- als auch praxisrelevante Aussagen über ein entsprechendes Indikatorsystem zu entwickeln. Deshalb müssen



die aufgeführten, nur auf einer Meßperiode beruhenden Grundwasser-Ergebnisse zunächst als vorläufig bewertet werden. Die Jahresamplituden der Wasserstände können in Abhängigkeit des jährlich wechselnden Witterungsverlaufes stark schwanken und müssen deshalb berücksichtigt werden. Feuchte Jahre bzw. feuchte Sommer zeigen sich an reduzierten Grundwasser-Schwankungsamplituden und hohen, lang andauernden Überflutungen. Entscheidender jedoch sind die trockenen Jahre bzw. entsprechende Sommer mit z.T. für die Vegetation kaum mehr verträglichen Grundwasser-Tiefständen. Deshalb sollten Meßreihen zumindest ein feuchtes, ein trockenes und wenn möglich noch ein weiteres Jahr mit mittlerer Witterung enthalten (s. van der LAAN 1979). Die bisherigen Witterungsdaten ergaben für das Jahr 2000 ein mittleres Jahr, so daß die Aussagekraft der aufgeführten Daten sich langfristig wahrscheinlich bestätigen wird.

#### **4. „Ausblick“ — Modellierung der Vegetationsentwicklung in feuchten Dünentälern am Beispiel der Insel Norderney**

Für das Dünenal Bakenlegde auf Norderney, das sich im zentralen Bereich des Trinkwassergewinnungsgebietes vom Wasserwerk „Weiße Düne“ befindet, wurde ein räumliches Vegetationsmodell entwickelt, das die Auswirkungen zukünftiger Grundwasserbewirtschaftung auf die Vegetationsdynamik abschätzen soll.

Als Vorbemerkung ist anzuführen, daß die Defizite klassischer ökologischer Modelle zumeist in dem nicht expliziten Raumbezug bestehen (s. O. RICHTER et al. 1997). Um dieses Problem zu umgehen, werden verstärkt rasterbasierte Ansätze zur Simulation der räumlichen und zeitlichen Dynamik von Ökosystemen angewandt. Rasterbasierte Modelle ermöglichen ferner die Abbildung natürlicher Prozesse durch Interaktionen einer endlichen Anzahl von Rasterzellen. Einen Ansatz zur expliziten räumlichen Simulation bieten Zelluläre Automaten. H. BALTZER et al. (1998) geben eine Übersicht über die Verwendung von Zellulären Automaten im Bereich Ökologie, Biologie und Umwelt, die nach J. WEIMAR (1998) aus folgenden vier Komponenten bestehen:

- Ein Gitter aus endlich vielen Rasterzellen
- Eine endliche Zustandsmenge zur Charakterisierung der Zellen
- Eine Nachbarschaft begrenzter Reichweite
- Ein Regelsystem, das die Veränderung der Zellzustände festlegt.

Für die Simulation der Vegetationsentwicklung in feuchten Dünentälern wird ein Gitter aus quadratischen Rasterzellen verwendet. Jeder Zelle wird ein Zustandsvektor zugeordnet, der die Vegetationseinheit und die fünf Standortfaktoren Bodenfeuchte, Bodenazidität, organische Substanz, Salinität und anthroppoogene Beeinträchtigung enthält (s. Abb. 9). Die räumliche Ausbreitung

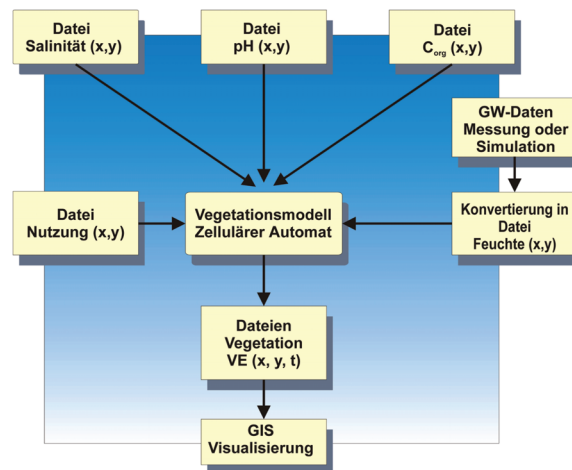


Abb. 9: Darstellung der Grundlagen des Vegetationsmodells – eine Verknüpfung mit den Standortfaktoren Bodenfeuchte, Bodenazidität, organische Substanz, Salinität und anthropozoogene Beeinträchtigung.

und Interaktion der Vegetationseinheiten wird über ein probabilistisches Regelsystem an die Dateien der Standortfaktoren gekoppelt. Die Informationen über die Zusammenhänge zwischen den Standortfaktoren und den Vegetationseinheiten stammen zum größten Teil aus J. PETERSEN (2000). Daten zur Empfindlichkeit der Vegetationseinheiten gegenüber Veränderungen der Standortfaktoren gehen auf die gleiche Quelle zurück. Mit den Angaben zur Empfindlichkeit wird beschrieben, welche Umweltbedingungen von den Vegetationseinheiten toleriert werden können.

Die Berechnung der Besiedlungswahrscheinlichkeiten der Standorte durch die Vegetationseinheiten berücksichtigt die Standortfaktoren, das Auftreten der Vegetationseinheiten in der direkten Nachbarschaft und das Ausbreitungspotential über größere Entfernungen. Die möglichen Sukzessionschritte sind dem Sukzessionsschema von PETERSEN (2000) entnommen (s. Abb. 4).

Das Modell ist in der Lage, Neubesiedlungen einer Dünentallandschaft zu simulieren. Durch noch laufende Sensitivitätsanalysen und Validierungen soll versucht werden, die Systemparameter optimal einzustellen. Das Ziel ist es, durch das Vegetationsmodell die Auswirkungen von Änderungen des Grundwasserhaushalts auf die Vegetationsentwicklung in feuchten Dünentälern noch genauer zu prognostizieren. Durch die Kopplung des Vegetationsmodells an Geographische Informationssysteme (z.B. ArcView) kann eine effektive Visualisierung der Simulationsergebnisse erfolgen (s. Abb. 9), die beispielsweise Ent-



scheidungsträgern in Wasserwirtschaft und Naturschutz die Auswirkungen von Maßnahmen vor Augen führt und zur besseren Kommunikation zwischen den Ressorts und ggf. der interessierten Öffentlichkeit beitragen kann. Wir haben es inzwischen auf alle Ostfriesischen Inseln ausgedehnt (PETERSEN & POTT, 2005)

## 5. Zusammenfassung

In diesem Vortrag werden sowohl Arbeitsschritte als auch erste Ergebnisse von Untersuchungen der Arbeitsgruppe Geobotanik vorgestellt, die im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojektes mit dem Titel *„Umweltverträgliche Grundwasserbewirtschaftung in hydrogeologisch und ökologisch sensiblen Bereichen der Nordseeküste“* erarbeitet wurden. Die unterschiedlichen Vorstellungen der Wasserwirtschaft und des Naturschutzes führen schon lange zu Zielkonflikten, die eine Gefährdung der Feuchtbiootope zur Folge haben können. Pflanzengesellschaften der feuchten Dünentäler sind stark grundwasserabhängig und können deshalb Grundwasserschwankungen nur in einem gewissen Toleranzbereich schadlos überstehen. Ziel unserer Untersuchungen war es daher, eine praktikable Konzeption für eine dauerhaft umweltschonende Grundwasserbewirtschaftung am Beispiel der verstädterten Insel Norderney und der dörflichen Insel Langeoog im Nationalpark Wattenmeer zu erarbeiten. Hierzu wurden kritische Schwellenwerte bzw. Toleranzbereiche wie untere und obere Begrenzungen sowie Optimalbereiche („critical levels“) des Grundwasserstandes für die charakteristischen Vegetationseinheiten der Naturschutzgebiete und ihrer Randbereiche ermittelt. Zusätzlich wurde ein Verfahren zur computertechnischen Visualisierung von Vegetationsentwicklungen erarbeitet.

## Summary

In this lecture material, methods and preliminary results are presented, which were obtained within the framework of an interdisciplinary research project entitled „Sustainable groundwater management in hydrogeological and ecological sensitive areas of the North Sea Coast“. For years different and contrary concepts of the water supply and distribution authorities and the nature conservation led to conflict situations which could result in the endangering of wet biotopes above all. These plant communities of the wet dune slacks are strongly related to the groundwater table, hence, they can tolerate fluctuations only in a certain range without damage. Therefore, the main goal of the project was to develop a useful guide for a sustainable groundwater management. Within the project detailed investigations were carried out on the islands of Norderney and Langeoog in the Nationalpark Wattenmeer. Using a variety of scientific methods (phytosociology, groundwater-monitoring, GIS mapping, cellular

automata model) it was possible to construct a comprehensive picture of threshold values or ranges of tolerance describing e.g. the lower and upper delimitations as well as critical levels of the groundwater table tolerable for the characteristic vegetation units of the conservation areas and the adjacent landscapes.

### Verwendete und zitierte Literatur

- BALTZER, H., BRAUN, P. & KÖHLER, W. (1998): Cellular automata models for vegetation dynamics. – *Ecological Modelling* **107**: 113–125.
- BUCHWALD, K. (1990): Nordsee – ein Lebensraum ohne Zukunft? – 552 S., Göttingen.
- DIERSSEN, K. (1988): Rote Liste der Pflanzengesellschaften Schleswig-Holsteins. – Schriftenreihe Landesamt für Naturschutz und Landschaftspflege Schleswig-Holstein **6**: 157 S., Kiel.
- DRACHENFELS, O. von (1996): Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen in Niedersachsen. – Naturschutz Landschaftspfl. Niedersachsen, **34**: 148 S., Hannover.
- DVWK (1996): Klassifikation überwiegend grundwasser-beeinflußter Vegetationstypen. – Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) **112**: 492 S., Bonn.
- ELLENBERG, H., WEBER, H., DOLL, R., WIRTH, V., WERNER, W. & FAULISSEN, D. (1992): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. – *Scripta Geobotanica* **18**: 258 S., Göttingen.
- FAHSOLD, A. (1960): Rhythmus des Grundwassers auf den Ostfriesischen Inseln. – *Gas- und Wasserfachmann* **101** (2): 26–33, Bremen.
- FROMKE, A. (1996): Vergleichende geobotanische Untersuchungen der Ostfriesischen Inseln Baltrum und Langeoog im Nationalpark „Niedersächsisches Wattenmeer“ – 229 S., Diss. Univ. Hannover.
- GROOTJANS, A., HARTOG, P., FRESCO, L. & ESSELINK, H. (1991): Succession and fluctuation in a wet dune slack in relation to hydrological changes. – *J. of Vegetation Science* **2**: 545–554, Groningen.
- GROOTJANS, A., LAMMERTS, E. & BEUSEKOM, C. VAN (1995): Kalkrijke duinvalleien op de Waddeneilanden. — KNNV: 175 S., Utrecht.
- HAHN, D. (2005) Neophyten der Ostfriesischen Inseln. Verbreitung, Ökologie, Vergesellschaftung. Diss. Inst. f. Geobotanik, Univ. Hannover
- HELBING, C. D. (1991): Zwischen Land und See. – Nationalpark 2/91, 4 S., Wilhelmshaven.
- HOBOMM, C. (1993): Die Pflanzengesellschaften von Norderney. Arbeiten aus der Forschungsstelle Küste 12. – Niedersächsisches Landesamt für Ökologie: 202 S.

- HOFMANN, K. (2000): Standortsökologie und Vergesellschaftung der *Utricularia*-Arten Nordwestdeutschland. – 130 S., Diss. Univ. Hannover.
- KLÖTZLI, F. (1969): Die Grundwasserbeziehungen der Streu- und Moorwiesen im nördlichen Schweizer Mittelland. – Beitrag zur Geobotanischen Landesaufnahme der Schweiz: **52**, 296 S., Bern.
- LAMMERTS, E. (1999): Basiphilous pioneer vegetation in dune slacks on the Dutch Wadden Sea islands. – Proefschrift: 160 S., Groningen.
- LAAN, D. van der (1979): Spatial and temporal variation in the vegetation of dune slacks in relation to the ground water regime. – *Vegetation* 39, **1**: 43–51, Oostvoorne.
- MÜLLER, A., MÜLLER, H. & VRIES, D. de (1997): Eine schonende Bewirtschaftung der Süßwasserlinsen auf den ostfriesischen Inseln am Beispiel der Insel Norderney. – *Zbl. Geol. Paläont. Teil 1*, (1/2): 111–124, Stuttgart.
- MÜLLER, H. & WOLFF, J. (1998): Ermittlung einer schonenden Bewirtschaftung der Süßwasserlinsen auf den Ostfriesischen Inseln am Beispiel der Insel Norderney. – 135 S., unveröffentlichter Endbericht, TU Braunschweig.
- NATIONALPARKVERWALTUNG NIEDERSÄCHSISCHES WATTENMEER (1992, Hrsg.): Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer. – 52 S., Wilhelmshaven.
- NEUHAUS, R. & PETERSEN, J. (1999): Dunes. – In: JONG, F. DE, BAKKER, J., BERKEL, C. van, DANKERS, N., DAHL, K., GÄTJE, C., MARENCIC, H. & POTEL, P. (Hrsg.): Wadden Sea Quality Status Report. Wadden Sea Ecosystem No. 9. Common Wadden Sea Secretariat, Trilateral Monitoring and Assessment Group, Quality Status Report Group: 53–56, Wilhelmshaven.
- NIEMANN, E. (1963): Beziehungen zwischen Vegetation und Grundwasser. Ein Beitrag zur Präzisierung des ökologischen Zeigerwertes von Pflanzen und Pflanzengesellschaften. – *Archiv f. Naturschutz u. Landschaftsforsch.*, B 3, H 1: 3–36, Berlin.
- NIEMANN, E. (1973): Grundwasser und Vegetationsgefüge. – *Nova Acta Leopoldina* 6, 38: 172 S., Leipzig.
- NORDHEIM, H. von, NORDEN ANDERSEN, O. & THISSEN, J. (1996): Red Lists of Biotopes, Flora and Fauna of the Trilateral Wadden Sea Area, 1995. – *Helgoländer Meeresuntersuchungen* **50** (Suppl.): 136 S., Hamburg.
- PETERS, M. & POTT, R. (1999): Natur & Tourismus auf Norderney. – *Abh. Westf. Museum f. Naturkde* 61, 174 S., Münster.
- PETERSEN, J. (2000): Die Dünenalvegetation der Wattenmeer-Inseln in der südlichen Nordsee. Eine pflanzensoziologische und ökologische Vergleichsuntersuchung unter Berücksichtigung von Nutzung und Naturschutz. – 336 S., Husum.
- PETERSEN, J., POTT, R. & O. RICHTER (2001): Dünentäler – Ein gefährdeter Lebensraum im Interessenkonflikt zwischen Naturschutz und Grundwasserbewirtschaftung. *Zbl. Geol. Paläont. Teil I*, Heft **1/2**, 93–110. Stuttgart.

- PETERSEN J. & R. POTT (2005): Ostfriesische Inseln: Landschaft und Vegetation im Wandel. Text- und Kartenband 160 S., Schlütersche, Hannover
- POTT, R. (1995): Farbatlas Nordseeküste und Nordseeinseln. – 288 S., Stuttgart.
- POTT, R. (1996): Biotoptypen – Schützenswerte Lebensräume Deutschlands und angrenzender Regionen. – 448 S., Stuttgart.
- POTT, R. (2003): Die Nordsee – Eine Natur- und Kulturgeschichte, 351 S., Verlag C.H. Beck, München
- POTT, R. (2005): Allgemeine Geobotanik – Biogeosysteme und Biodiversität. 652 S. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- RICHTER, O., SÖNDGERATH, D., BELDE, M., SCHWARTZ S. & SCHRÖDER, B. (1997): Kopplung geographischer Informationssysteme (GIS) mit ökologischen Modellen für das Naturschutzmanagement. – In: KRATZ, R. & SUHLING, F. (Hrsg.): GIS im Naturschutz – Forschung, Planung, Praxis. Verlag Westarp Wissenschaften: 5–29, Magdeburg.
- STREIF, H. (1987): Geologie unseres Küstenraumes. – Wilhelmshavener Tage 1: 5–12.
- STREIF, H. (1990): Das Ostfriesische Küstengebiet. Nordsee, Inseln, Watten und Marschen. – Samml. Geol. Führer 57: 376 S., Berlin, Stuttgart.
- TÜXEN, R. (1954): Pflanzengesellschaften und Grundwasser-Ganglinien. – Angew. Pflanzensoz. 8: 64–98, Stolzenau.
- WEIMAR, J. (1998): Simulation with cellular automata. – Logos-Verlag. Berlin
- WESTHOFF, V. (1991): Die Küstenvegetation der Westfriesischen Inseln. – Ber. d. Reinh.-Tüxen-Ges. 3: 269–290, Hannover.
- WESTHOFF, V., HOBOM, C. & SCHAMINÉE, J. (1993): Rote Liste der Pflanzengesellschaften des Naturraumes Wattenmeer unter Berücksichtigung der ungefährdeten Vegetationseinheiten. – Tuexenia 13: 109–140, Göttingen.

## **Optimierung der Produktion eines toxischen Fusionsproteins mit rekombinanten Bakterien\***

KARL SCHÜGERL

Arnumer Kirchstraße 31, D-30966 Hemmingen

Die Produktion von Proteinen mit rekombinanten Mikroorganismen ist Stand der Technik. Die hohe Konzentration des Protein-Produktes belastet die Mikroorganismen. Um diese Belastung los zu werden, kann das Bakterium die Proteinfaltung ändern und es so unlöslich machen (Bildung von inclusion body) oder durch Proteasen abbauen. Besonders schwierig ist die Produktion von Proteinen, die für die Zelle toxisch sind.

Wie vermeidet man, dass das Produkt die Zelle tötet?

Diese Frage wird am Beispiel der Produktion eines Fusionsproteins mit rekombinantem *Escherichia coli* JM109 diskutiert.

Das Fusionsprotein enthält Restriktionsendonuclease EcoRI. Die Untersuchung und Verbesserung dieses Enzyms mit Protein design war ein Forschungsgebiet des Arbeitskreises von Herrn Maas.

In Kooperation mit diesem Arbeitskreis haben wir die prozesstechnischen Aspekte der Bildung von Restriktionsendonuclease untersucht.

### **Das biologische System**

Das Produkt ist ein Fusionsprotein von Staphylococcus Protein A und EcoRI, bezeichnet durch SPA::EcoRI.

EcoRI ist ein Enzym, Restriktionendonuclease, das die DNA abbaut. Dieses Enzym wird bei der Gentechnik verwendet. Auch die zelleigene DNA wird abgebaut, wenn sie nicht geschützt wird.

Der Vorteil des Fusionsproteins ist die höhere Stabilität des Produktes (Schutz vor Abbau von EcoRI durch Proteasen).

---

\* Vortrag gehalten am 11.11.2005 in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

Der verwendete Wildtyp von *Escherichia coli* JM109 trägt ein Episom den lac-Repressor, der die Repression von  $P_{Lac}$  ermöglicht. Für die Verwendung von Plasmiden mit  $P_L$ - oder  $P_R$ -Promotoren muss diesem Stamm jedoch das Repressorgen *cI857* durch zusätzliches Plasmid beigefügt werden.

Zur Produktion des Fusionsproteins werden geeignete Plasmide in die Zelle eingeschleust. Man benötigt ein Produktionsplasmid, das das Fusionsprotein SPA::EcoRI codiert. Hier wurde das *Produktionsplasmid pMTC48* verwendet. Das Gen für das Fusionsprotein steht unter der Transcriptionskontrolle der beiden unabhängig voneinander wirksamen Promotoren  $P_R$  und  $P_{LacUV5}$ . Die Transcription des Produktgens erfolgt durch chemische Induktion mit IPTG (Isopropyl- $\beta$ -D-thiogalactosid) über den  $P_{LacUV5}$ -Promotor oder durch thermische Induktion mit Temperaturerhöhung über den  $P_R$ -Promotor.

Das *Repressionsplasmid pCI857* vermittelt dem Wirtstamm das konstitutiv exprimierte, temperatursensitive CI857 Repressorprotein. Es hat den Marker der Resistenz gegen Kanamycin. Das Gen steht unter Kontrolle des autoregulativen Promotors  $P_M$ . Auch das Plasmid *pRK248cI* überexprimiert das CI857 Repressorprotein. Das Plasmid trägt das Resistenzgen gegen Tetracyclin.

Das *Schutzplasmid pEcorR4* verhindert den Abbau der zelleigenen DNA. Das Plasmid kodiert die DNA-Methylase der Restrictionendonuclease EcoRI. Das Enzym DNA-Methylase methyliert die EcoRI-Schnittstelle im Bakteriumgenom konstitutiv und schützt die Zelle vor dem Abbau durch das Fusionsprotein mit EcoRI-Aktivität. Das Plasmid trägt das Resistenzgen gegen Chloramphenicol. In Abwesenheit des Schutzplasmids kann kein Produkt nachgewiesen werden.

Die Kombination der Plasmide *pMTC48*, *pRK248cI* und *pEcorR4* ergab die höchste Produktivität.

Zur Produktion des Fusionsproteins muss man das Bakterium hochzüchten.

Folgende Kultivierungsmedien wurden verwendet: Minimal-Medium (mit chemisch definierten Komponenten) und Komplex-Medium (mit Hefeextrakt oder Casein als Proteinanteil). Der Wildtyp von *E. coli* JM109 wächst nicht im Minimal-Medium. Der plasmidhaltige Stamm wächst sowohl in Minimal-Medium als auch im Komplex-Medium. Der Wildstamm wächst jedoch schneller in Komplex-Medium als der rekombinante Stamm, da die Plasmide die Zellen belasten.

Genexpression und Produktbildung sind nur im Komplex-Medium möglich.

### Satzkultivierung

Man startet mit hoher Konzentration des Substrates (Glucose), um hohes Wachstum zu erreichen. Wegen der hohen anfänglichen Substratkonzentration ist die

Konzentration der Nebenprodukte Acetat und Pyruvat sehr hoch, was zur Reduktion der Wachstumsgeschwindigkeit und der Produktbildung führt. Daher hat diese Produktionsweise erhebliche Nachteile.

Die Genexpression mit  $P_R$ -Promotor wird durch die Erhöhung der Temperatur von 30°C eingeleitet. Die optimale Temperatur für die Genexpression und Produktbildung ist 38°C. Trotzdem wird 40°C verwendet, da bei dieser Temperatur die Genexpression schneller abläuft.

Die chemische Induktion des  $P_{lacUV5}$ -Promotors erfolgt durch Zudosierung von IPTG. Die optimale Konzentration von IPTG hängt von der Größe des Mediumvolumens ab. Je größer das Mediumvolumen, um so höher ist die optimale IPTG-Konzentration. Wegen des hohen Preises des Induktors ist dies ein schwerwiegender Nachteil der chemischen Induktion.

Nach der Induktion der Genexpression nimmt die Kopiezahl der Plasmide stark ab.

Ein Vergleich der beiden Expressionssysteme in kleinen Reaktoren ergibt für die Temperaturinduktion fünffach höhere Expression als für die chemische Induktion. Dies entspricht dem Promotorstärkenverhältnis  $P_R$  zu  $P_{LacUV5}$ . Der Zeitpunkt der Einleitung der Induktion beeinflusst die Produktmenge. Der optimale Zeitpunkt für die Induktion ist das Ende der exponentiellen Wachstumsphase.

Da während der Genexpression der Zellstoffwechsel stark ansteigt, ist es notwendig die Konzentrationen des Substrates und des Sauerstoffs zu erhöhen. Daher wird bei Induktion proteinhaltiges Substrat dem Reaktor zugeführt und die Rührerdrehzahl erhöht.

In großen Reaktoren ist die Temperaturinduktion ineffizient, da in ihnen keine schnelle Temperaturerhöhung möglich ist. Zu geringe Steigung der Temperatur führt zur ineffektiven Induktion. Die Erhöhung der Temperatur der Reaktorwand führt zur Schädigung der Zellen.

### Kontinuierliche Kultivierung

Eine spezielle kontinuierliche Kultivierungsmethode, die Chemostat-Kultivierung, wurde gewählt, da sie eine selbststabilisierende stationäre Arbeitsweise ist, bei der das Substrat voll verstoffwechselt wird. Es herrscht ständig Substratlimitierung vor.

Die Aufenthaltszeit oder Verweilzeit der Zellen  $\tau$  im Reaktor wird durch die Flussrate des Mediums  $F$  durch den Reaktor und durch das Volumen des Mediums  $V$  vorgegeben: Die Definitionen der Aufenthaltszeit  $\tau$  und der Verdünnungs-

rate  $D$  sind:  $\tau(h) = V F^{-1}$  und  $D (h^{-1}) = F V^{-1}$ . Die Verdünnungsrate  $D (h^{-1})$  und die spezifische Wachstumsrate  $\mu (h^{-1})$  sind in Chemostaten gleich. Die Definition der spezifischen Wachstumsrate lautet:

$$\mu = \left( \frac{dX}{dt} \right) \frac{1}{X}$$

wobei  $X$  = Zellmassenkonzentration ist.

Die maximal mögliche Verdünnungsrate ist durch die maximale spezifische Wachstumsgeschwindigkeit  $\mu_{\max}$  begrenzt. Bei kontinuierlicher Arbeitsweise lässt sich eine hohe Substratkonzentration im Medium vermeiden, die zur Bildung von Nebenprodukten führt und die Ausbeute reduziert.

Die einstufige kontinuierliche Kultivierung hat den Nachteil, dass das Wachstum und die Genexpression in demselben Reaktor gleichzeitig erfolgen, obwohl sie sehr unterschiedliche Bedingungen erfordern: Daher eignet sich die einstufige kontinuierliche Kultivierung nicht zur Produktion des Fusionsproteins SPA::EcoRI.

### **Zweistufige Chemostat-Kultivierung**

Hier werden das Wachstum und die Produktbildung in getrennten Reaktoren durchgeführt. In der ersten Chemostat-Stufe erfolgt das Wachstum und in der zweiten Stufe die Induktion der Genexpression. Um das Wachstum des Wildstammes in der ersten Stufe zu verhindern, wird Minimal-Medium verwendet. Dadurch wird die Konkurrenz mit den plasmidfreien Zellen ausgeschaltet.

Die optimale Temperatur des Wachstums ist 30°C. Die Aufenthaltszeit der Zellen in der ersten Stufe wurde so gewählt, dass die Plasmidverluste gering sind.

In der zweiten Stufe wird die Induktion der Genexpression bei erhöhter Proteinkonzentration bei einer Temperatur von 40°C oder in Anwesenheit von IPTG vorgenommen. Die Genexpression bedeutet eine starke Belastung der Zellen. Als Folge verlieren Zellen einen Teil der Plasmide und die Zellen sterben ab..

### **Mechanistisches mathematisches Modell für Satzkultivierung**

Aus den Gleichungen der Bildungsgeschwindigkeiten der Zellmasse, der Plasmide, der Enzyme, des Produktes und der Nebenprodukte wird die Stoffbilanz für diese Komponente aufgestellt. Nach der Identifikation der Modellparameter aufgrund der gemessenen Daten werden die Änderungen der Konzentrationen der Schlüsselkomponente als Funktion der Prozessvariablen ermittelt. Mit dem Modell lassen sie die Änderungen der Konzentrationen der Zell-



masse, des Substrates, der Nebenprodukte und der Plasmide in Satzkultur bis zur Genexpression gut beschreiben. Der Nachteil dieses Modells ist, dass es die Induktion der Genexpression nicht beschreiben kann. Dazu wurde ein genetisch strukturiertes Modell entwickelt.

### **Genetisch strukturiertes mathematisches Modell für Satzkultivierung**

Als erstes wurde die Kinetik der Transformation und Transcription der Gene, die in die Plasmide geklont wurden, ermittelt. Die Expression des  $\text{spa}::\text{ecoRI}$  Gens und  $\text{cI}$ -Gens werden durch den  $\lambda$  CI Repressor kontrolliert. Das  $\text{spa}::\text{ecoRI}$  Gen wird durch den  $\lambda P_R$ -Promotor und das  $\text{cI}$ -Gen durch den  $\lambda P_L$ -Promotor kontrolliert. Bei hohen Temperaturen wird der Repressor CI 857 inaktiviert, die Repression wird aufgehoben und die Transcription des  $\text{spa}::\text{ecoRI}$  Genes kann erfolgen.

Zuerst wurden die Transcriptions- und Translations-Syntheseraten der Plasmide und die Bindung des CI-Repressors an die Operatoren  $O_L$  und  $O_R$  bei 30°C entwickelt. Bei einer Temperatur von 40°C wird der Repressor CI 854 nach einer Reaktion erster Ordnung inaktiviert. Aus diesen Abhängigkeiten werden die kinetischen Gleichungen der Bildung des Fusionsproteins und der Methylase bei 30°C abgeleitet. Das Expressionsniveau von Methylase ist immer höher als das von  $\text{SPA}::\text{EcoRI}$ . Bei 30°C bleibt der Wirt lebensfähig, weil seine DNA im gesamten Zeitbereich durch Methylase geschützt wird. Bei 40°C übersteigt die Aktivität von  $\text{SPA}::\text{EcoRI}$  weit die Aktivität von Methylase. Als Folge wird die Induktion der Expression des  $\text{spa}::\text{ecoRI}$ -Gens den Wirt durch die unkontrollierte Spaltung seiner DNA töten. Bei kurzen Verdoppelungszeiten  $T$  übernimmt das Enzym Methylase die Kontrolle. Bei noch kürzeren Verdoppelungszeiten nimmt die Konzentration des Repressorproteins zu und als Folge kann das Repressorprotein auch bei 40°C nicht vollständig deaktiviert werden. Daher wird der Repressor im Medium angereichert. Bei sehr hohen Verdünnungsraten schützt daher Methylase die DNA des Wirtes vom Fusionsproteins auch bei 40°C.

### **Übertragung dieser Ergebnisse auf die zweistufige Anlage**

Die Beziehungen zwischen der Verdoppelungszeit  $T$ , der spezifischen Wachstumsrate  $\mu$ , der Verdünnungsrate  $D$  und der Aufenthalt der Zellen  $\tau$  im Reaktor sind:  $T = \ln 2 / \mu = \ln 2 / D = \ln 2 \cdot \tau$

Da in der zweiten Stufe kein Wachstum stattfindet, spielt nur die Zeitdauer der Genexpression eine Rolle. Die Verweilzeit  $\tau$  der Mikroorganismen in der zwei-

ten Stufe muss zur Genexpression ausreichen. Wegen des extrem schnellen Temperaturanstiegs beim Übergang aus der ersten in die zweite Stufe ist die Genexpression sehr schnell und sehr effektiv. Bei sehr hohen Verdünnungsraten in der zweiten Stufe schützt Methylase die DNA des Wirtes vor dem EcoRI auch bei 40°C. Daher brauchen wir in der zweiten Stufe nur einen sehr kurzen Aufenthalt der Zellen.

Nach der Induktion der Genexpression verlassen die Zellen sofort die zweite Stufe und ihre Temperatur wird reduziert. Damit werden die Verluste der Plasmide und der Abbau des Fusionsproteins vermindert.

Das Volumen der zweiten Stufe muss kleiner sein als das Volumen der ersten Stufe. Dadurch sollen in der zweiten Stufe sehr kurze Verweilzeiten erreicht werden und es soll verhindert werden, dass die Zellen während der Genexpression getötet werden. Die Aufenthaltszeit muss jedoch so groß sein, dass die Genexpression voll entfalten kann.

Die Induktion der Genexpression durch Temperaturerhöhung lässt sich in einer zweistufigen Anlage auch nach Maßstabvergrößerung mit hohem Wirkungsgrad durchführen, da die Zellen bei ihrem Wechsel aus der ersten in die zweiten Stufe einen schnellen Temperaturanstieg durchlaufen.

### **Ergebnisse in Satz- und kontinuierlichen Kulturen**

Durch geeignete Prozessführung wurden sowohl im Satzbetrieb als auch in kontinuierlicher Kultur sehr hohe Aktivitäten erreicht.

In der Satzkultur wurden spezifische Aktivitäten von 40.000-50.000 U/mg (Zellmasse) und auf die Produktbildungszeiten bezogenen Produktivitäten von 22.000-25.000 U/mg h erreicht.

In zweistufiger kontinuierlicher Kultur wurden Aktivitäten von 103.000 U/ml, spezifische Aktivitäten von 35.000U/mg (Zellmasse) und Produktivitäten von 225.000 U/mg h erzielt.

Da bei der Satzkultivierung mindestens die Hälfte der Zeit zum Entleeren, Reinigen und Neufüllen des Reaktors sowie zur Sterilisation des Mediums und Hochzüchten der Bakterien benötigt wird, muss die auf die Produktbildungszeit bezogene Produktivität auf die Hälfte reduziert werden. Daher ist die zweistufige kontinuierliche Kultivierung wirtschaftlicher als die Satzkultivierung. Des Weiteren bleibt der hohe Wirkungsgrad der Genexpression durch Temperaturerhöhung auch nach Maßstabvergrößerung in zweistufiger kontinuierlicher Kultur erhalten.

## Anwendungen von Hochtemperatur-Supraleitern in der elektrischen Energieversorgung\*

MANFRED LINDMAYER

Elektrische Energieanlagen, TU Braunschweig  
Schleinitzstraße 23A, D-38106 Braunschweig

### 1. Einführung

Bild 1 zeigt das stark vereinfachte Prinzip der elektrischen Energieversorgung und die darin eingesetzten Betriebsmittel. Im Prinzip könnten an allen Stellen statt der heutigen konventionellen Technik mit Kupfer- oder Aluminiumleitern Betriebsmittel mit supraleitenden Komponenten eingesetzt werden. Die Anwendung der Supraleitung in Netzen der elektrischen Energieversorgung wurde in Einzelfällen bereits in den 70er Jahren, lange vor der Entdeckung der keramischen Hochtemperatur-Supraleiter diskutiert und untersucht. Die damals allein zur Verfügung stehenden „Tieftemperatur“-Supraleiter (TTSL) aus Niob-Legierungen (NbTi, kritische Temperatur  $T_C=9$  K und Nb<sub>3</sub>Sn,  $T_C=18$  K) erforderten eine aufwendige und teure Kühltechnik auf der Basis von Flüssig-Helium (4,5 K). Die Tieftemperatur-Technik konnte wegen der hohen Kosten und des

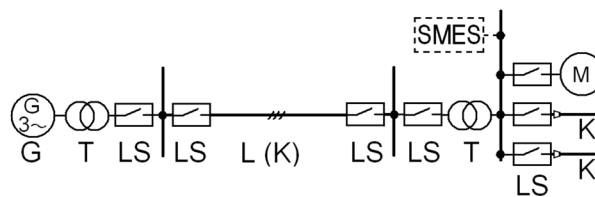


Bild 1: Schema der el. Energieversorgung  
G Generator, L Leitung, T Transformator, M Motor, K Kabel,  
LS Leistungsschalter (Kurzschlußschutz)  
SMES supraleitender magn. Energiespeicher  
(nur supraleitend realisierbar)

\* Vortrag gehalten am 11.02.2005 in der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

betrieblichen Aufwandes aber nicht in die elektrische Energieversorgung Eingang finden. Neue Impulse mit einer Vielzahl von Forschungsprojekten weltweit löste die Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL) vor fast zwei Jahrzehnten aus. Die kritische Temperatur dieser keramischen Materialien liegt mit z.B. ca. 90 K (YBCO) oder 110 K (BSCCO 2223) so hoch, daß der Betrieb in vielen Anwendungen mit dem wesentlich einfacher zu handhabenden und kostengünstigeren Flüssig-Stickstoff (LN<sub>2</sub>), dessen Siedetemperatur bei Normaldruck bei 77 K (-196 °C) liegt, möglich ist. In anderen Fällen sind zwar tiefere Temperaturen, z.B. 30-40 K, notwendig. Hier stehen jedoch einfache und robuste Kryokühler zur Verfügung, deren Verluste viel geringer als bei der 4,5 K-Technik sind.

Pauschal werden für die Supraleitertechnik insgesamt folgende Vorteile ins Feld geführt:

- Verbesserter Wirkungsgrad (geringere Verluste)
- geringere Größe, geringeres Gewicht
- verbesserte Energiequalität (power quality)
- erhöhte Systemzuverlässigkeit
- Geringere Umweltbelastung, u.a. CO<sub>2</sub>-Reduzierung

Der Vortrag gibt einen Überblick über mögliche Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleitung in Netzen der elektrischen Energietechnik, wobei insbesondere auf die technischen Besonderheiten eingegangen wird. Aus Zeitgründen erfolgt dabei eine Beschränkung auf die drei Betriebsmittel Synchronmaschinen, Kabel und Strombegrenzer. Weitere Anwendungen sowie Details können [1] entnommen werden.

## 2. Leitermaterialien und -formen

Nachstehend sind die Supraleiter aufgeführt, die in bisherigen Energietechnik-Projekten größere Bedeutung erlangt haben:

### a) Massivmaterialien

YBCO 123 ( $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ) mit  $T_C \approx 90$  K. Die Zahlen sind die Molzahlen der ersten drei Komponenten. BSCCO 2223 ( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ ) mit  $T_C \approx 110$  K und BSCCO 2212 ( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_{8-x}$ ) mit  $T_C = 80-90$  K. Typische kritische Stromdichten von Massivmaterialien, die vielfach über Schmelzverfahren hergestellt werden, liegen zwischen  $10^3$  und  $4 \cdot 10^4$  A/cm<sup>2</sup> bei 77 K. Ihre Anwendungsfälle liegen bei kryotechnischen Hochstromzuführungen, Strombegrenzern, Maschinen oder Magnetlagern.

### b) Drahtförmiges Verbundmaterial

(Bi,Pb)BSCCO 2223 mit Ag-Mantel, sog. „Powder-in-Tube“ Material. Durch Bündelung mehrerer Ag/BSCCO-Rohre und Deformation beim Herstellprozess

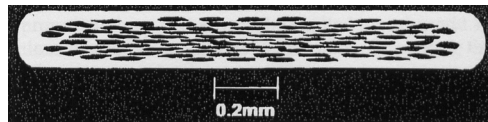


Bild 2: Querschnitt durch einen BSCCO-Multifilament-Leiter mit Ag-Matrix

entstehen sog. Multifilament-Leiter, siehe Bild 2. Durch Legierungszusätze zum Ag kann die mechanische Festigkeit verbessert oder die thermische und elektrische Leitfähigkeit verringert werden. Die Ag-Matrix stabilisiert den Leiter im Betrieb gegen lokale Überlastung. Ihr aus Kostensicht wünschenswerter Ersatz durch das billigere Kupfer oder andere Metalle ist nicht möglich, da Ag aus reaktionskinetischen Gründen bei der Herstellung benötigt wird. Eine Variante ist für höhere Festigkeit zusätzlich mit Edelstahlschichten laminiert. Die kritische Stromdichte dieser Leiter, bezogen auf den Gesamtquerschnitt, beträgt bis  $1,5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ . Diese in großen Längen bereits industriell gefertigten Drähte sind das bisherige „Standardmaterial“ für Kabel und Wicklungen in Maschinen, Transformatoren und HTS-SMES.

- c) *Dünnschicht- ( $<1\mu\text{m}$ ) YBCO 123 auf keramischen Substraten, z.B. 0,5 mm dick.*

Diese einkristallinen Schichten weisen sehr hohe kritische Stromdichten bis über  $3 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$  auf. Voraussetzung dafür ist ein orientiertes Wachstum der YBCO-Kristalle auf dem tragenden Substrat, da YBCO aufgrund seiner Kristallstruktur anisotrope Materialeigenschaften aufweist. Eine gute Orientierung (Textur) kann aber nur mit angepassten Gitterkonstanten von Substrat und YBCO erreicht werden. Deshalb wird häufig mit dünnen (wenigen 10 nm) Zwischenschichten gearbeitet, und es sind nur wenige teure Substrate bzw. Substrat-Zwischenschicht-Kombinationen geeignet. Solche Dünnschicht/Substrat-Kombinationen, wie sie sonst für die Informationstechnik eingesetzt werden, eignen sich für supraleitende Strombegrenzer.

- d) *Dünnschicht-YBCO auf Metallbändern (Ni-Legierungen, Edelstahl)*

Die Eigenschaften der Dünnschichten entsprechen prinzipiell c). Aus dieser Kombination können einige mm breite, dünne und flexible „Drähte“ hergestellt werden, die als „second generation“ der Bandleiter (vgl. Bild 2) bezeichnet werden. Man erwartet vielseitig verwendbare Leiter mit besseren Daten und zu Kosten, die weit unter denen bisheriger Leiter liegen sollen (Ziel 10 \$/(kA·m)). Wegen des vorstehend geschilderten Sachverhaltes ist ein Aufbau mit mehreren Zwischenschichten erforderlich, siehe Bild 3.

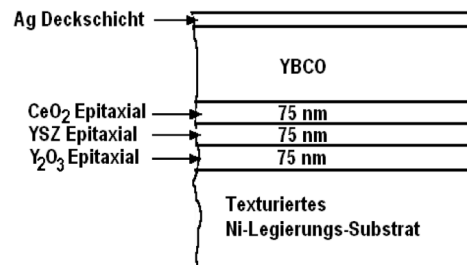


Bild 3: YBCO-Dünnschicht auf Metallsubstrat mit Zwischenschichten im Querschnitt

### 3. Betriebsmittel mit HTSL

#### 3.1 Elektrische Maschinen, Synchronmaschinen

Bei bisherigen größeren Projekten im internationalen Maßstab standen überwiegend Synchrongeneratoren bzw. -Motoren im Vordergrund. Auf sie soll hier eingegangen werden. Bereits in den 70er Jahren wurde an Generatoren mit TTSL-Erregerwicklungen gearbeitet. Man hatte damals noch größerer Generatorgrenzleistungen für Kernkraftwerke im Auge, die man mit normalleitenden Erregerwicklungen nicht erzielen konnte. Inzwischen steht diese Motivation nicht mehr im Vordergrund. Der Grundaufbau ist aber bei neueren Versuchsmaschinen ähnlich, jedoch sind sie in der Leistung und Größe kleiner. Die supraleitende rotierende Feldwicklung (Erregerwicklung) befindet sich in einem Kryostaten, der, wie in der Kryotechnik Standard, Vakuum zur thermischen Isolierung verwendet. Die konventionelle Kupfer-Ankerwicklung im Stator befindet sich auf Raumtemperatur. Das Magnetfeld der rotierenden Feldwicklung ist höher als bei herkömmlichen Maschinen, da der Erregerstrom wegen der fehlenden Kupferverluste höher sein kann. Typisch sind Flußdichten von 1,5 bis 2 T, gegenüber konventionellen Maschinen etwa doppelt so hoch. Insgesamt ist das Volumen der Maschine, und da auch weit weniger Eisen verwendet wird, das Gewicht deutlich geringer. Weniger Eisen und der wegen der Kryoisolation ohnehin größere Luftspalt bewirken eine sehr geringe Synchronreaktanz (0,15 bis 0,5 p.u. gegenüber 1,5 bis 2,5 bei herkömmlichen Synchronmaschinen). Insgesamt ist dadurch das Verhalten am Netz viel robuster, und es muß weniger regelungstechnischer Aufwand getrieben werden.

Wegen der Kompaktheit und des geringeren Gewichts sind neben Generatoren auch Anwendungen als supraleitende Synchronmotoren sehr interessant, insbesondere für den Antrieb von militärischen und zivilen Schiffen. Sowohl Kosten als auch kostbares Lade- bzw. Passagiervolumen und -Gewicht werden einge-

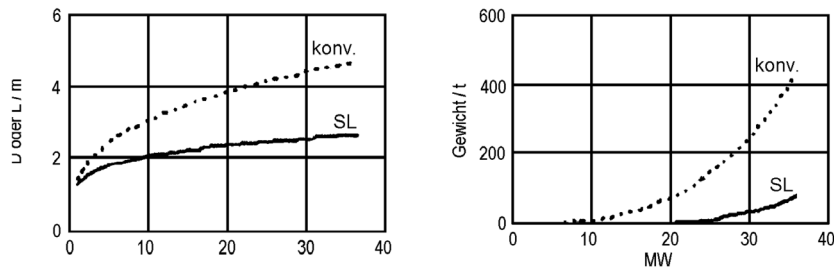


Bild 4: Volumen- und Gewichtsvergleich von Schiffsantrieben mit konventionellen und supraleitenden Synchronmaschinen

spart, siehe Bild 4. Deshalb stoßen solche Motoren bei Entwicklungsprojekten auf besonderes Interesse.

### 3.2 Kabel

Wegen des Wegfalls des ohmschen Widerstandes, zumindest des Gleichstromwiderstandes, können die Leiter viel mehr Strom transportieren als herkömmliche Kupfer- oder Aluminiumleiter. Abhängig von der Kabelbauart sind dies nach heutigen Erfahrungen und Abschätzungen bei gleicher Spannung mindestens die doppelte bis zur zehnfachen Leistung. Von besonderer Bedeutung ist auch die Möglichkeit der erheblichen Erhöhung der Übertragungsleistung, ohne die Betriebsspannung erhöhen zu müssen.

Die bei den weltweit zahlreichen Projekten untersuchten Konzepte lassen sich unterscheiden nach Warm Dielectric (WD) und Cold Dielectric. (CD). Bild 5 zeigt Einleiterkabel dieser beiden Varianten. Beim WD-Kabel befindet sich nur der Innenleiter im Kryobereich, die elektrische Isolierung und der normalerweise koaxiale Kabelschirm aus Kupfer auf Raumtemperatur. Beim CD-Kabel sind sowohl der Innenleiter als auch der den gleichen Rückstrom tragende Schirm in

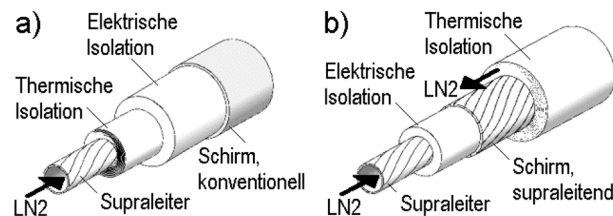


Bild 5: HTSL-Kabel mit warmem (a) und kaltem Dielektrikum (b)

Tabelle 1: Merkmale der WD- und CD-Kabel

Warmes Dielektrikum, WD	Kaltes Dielektrikum, CD
Höhere elektr. Verluste (Cu-Mantel), höhere Kühlleistung, geringere Kühlstations-Abstände	Geringere Verluste, höhere Stromtragfähigkeit,
Konv. extrudiertes Dielektrikum	Kryo-Isoliersystem
Weniger HTSL-Material	Mehr HTSL-Material
Induktivität ähnl. NL-Kabel	Kleine Induktivität, 1/5
höhere AC-Verluste	Geringere AC-Verluste
Magnetische Streufelder	Keine Streufelder
Wärme an Umgebung	keine Wärmeabgabe

geringem Abstand innerhalb des Kryobereichs angeordnet. Das Kühlmittel LN<sub>2</sub> stellt einen Bestandteil des Isoliersystems dar. Die i.a. flachen HTS-Leiter sind auf einem Trägerrohr verseilt aufgebracht.

Die aus dem unterschiedlichen Aufbau resultierenden Merkmale sind in Tabelle 1 gegenübergestellt. Wegen seiner Vorzüge dürfte sich voraussichtlich das CD-Kabel durchsetzen.

### 3.3 Strombegrenzer

#### 3.3.1 Prinzip

Schon seit den 60er Jahren haben sich Strombegrenzer für den Kurzschlußschutz, sog.  $I_S$ -Begrenzer in konventioneller, lichtbogenbehafteter Technik bewährt. Sie sprechen im Kurzschlußfall sehr rasch an und begrenzen den Kurzschlußstrom, bevor er seinen Scheitelwert erreichen kann. Dadurch wird sowohl die thermische als auch die dynamische Beanspruchung der Betriebsmittel im nachgeordneten Netz reduziert, und sie können im Prinzip schwächer dimensioniert werden. Auch auf die Netzstabilität wirkt sich eine rasche Abschaltung positiv aus. Bisher werden diese Strombegrenzer nur in Sonderfällen bei besonderen Netzkonstellationen eingesetzt. Der herkömmliche Netzschutz



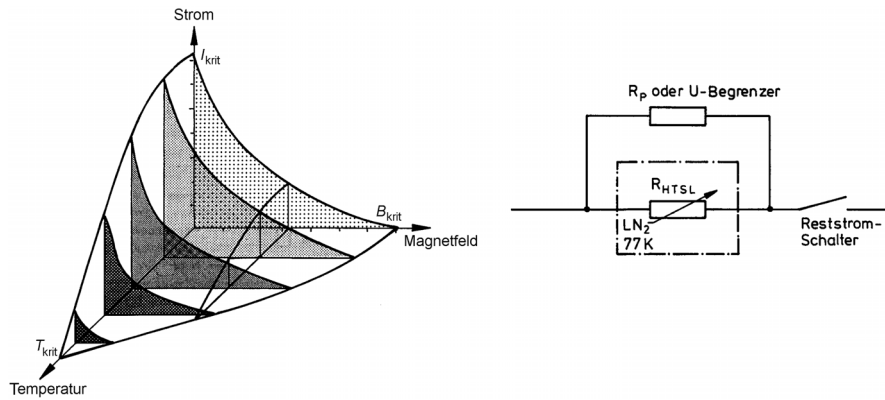


Bild 6: Existenzbereich der Supraleitung (links) und Prinzip des resistiven Strombegrenzers (rechts)

beruht hingegen auf dem Prinzip der gewollten Zeitverzögerung, um die Selektivität zu gewährleisten. Eine Strombegrenzung findet nicht statt. Die Betriebsmittel müssen so dimensioniert sein, daß sie den dabei auftretenden Beanspruchungen standhalten. Im Zusammenhang mit der Anwendung der Hochtemperatur-Supraleitung zur Strombegrenzung werden viele Einsatzmöglichkeiten der Strombegrenzer-Technik neu diskutiert und untersucht. Hinzu kommt, daß man im Zuge der Deregulierung stärker an die Grenzen der Netze geht. Strombegrenzer, z.B. in Netzkupplungen, können erhebliche Investitionskosten in Betriebsmittel höherer Kurzschlußfestigkeit sparen. Hingegen wird eine komplette Umstellung des Schutzkonzeptes zu Gunsten von Strombegrenzern auf absehbare Zeit ausscheiden. Anders kann die Situation bei zunehmendem Einsatz anderer supraleitender Betriebsmittel werden. Anstatt supraleitende Kabel oder Transformatoren kurzschlußfest zu machen, kann man sich vorstellen, daß man zu deren Schutz Strombegrenzer einsetzt, und damit die supraleitenden Aktivteile schwächer dimensioniert.

Die folgenden Ausführungen seien auf das Prinzip des sog. resistiven HTSL-Strombegrenzers (Bild 6) beschränkt. Während andere HTSL-Betriebsmittel im Normalfall stets supraleitend bleiben sollen, müssen supraleitende Strombegrenzer gezielt von der Supra- in die Normalleitung übergehen (Quench), und begrenzen dadurch den Strom. Der Supraleiter wird resistiv, wenn entweder der kritische Strom, die kritische Temperatur oder das kritische Magnetfeld überschritten werden. Beim resistiven Strombegrenzer erfolgt die Auslösung selbsttätig, wenn der Kurzschlußstrom den kritischen Strom überschreitet. Dem definierten und reproduzierbaren Übergang in die Normalleitung kommt deshalb besondere Bedeutung zu.

### 3.3.2 Vergleich zweier resistiver Begrenzerkonzepte

Zur Verdeutlichung der Vorgänge bei der Strombegrenzung sowie des Verhaltens unterschiedlicher Begrenzerkonzepte sollen nachstehend zwei Varianten verglichen werden:

a) *YBCO-Dünnschicht mit Au-Shuntschicht auf synthetischem Saphirsubstrat*

Ein bei Siemens aus Elementen modular aufgebauter Begrenzer besteht aus einer größeren Anzahl von Elementen. Jedes Element besteht aus einem Saphirwafer 100 mm Durchmesser, ca.  $0,3\ \mu\text{m}$  YBCO von  $J_C > 2\ \text{MA/cm}^2$  und ca. 100 nm Au-Shuntschicht. Eine Shuntschicht parallel zum Supraleiter ist notwendig, um „hot spots“ an Stellen, die wegen unvermeidlicher Fertigungsstreuungen lokal an Längenabschnitten etwas geringerer kritischer Stromdichte entstehen würden, zu vermeiden. Ein Demonstrator von 1 MVA Nennleistung verwendete je Phase 4 Elemente parallel und 7 in Reihe geschaltet. Er wurde mit 6 kV dreiphasig erfolgreich getestet. Bezieht man den Effektivwert der dreiphasigen Nennspannung auf die Leiterlänge je Phase, so sind das 10,7 V/cm. Der Durchlaßstrom-Scheitelwert, d.i. die Stromhöhe, auf welche der Kurzschlußstrom begrenzt wurde, lag mit dem 2- bis 3-fachen kritischen Strom sehr niedrig.

b) *BSCCO 2212 Massivmaterial mit metallischem Shunt und Epoxidharzverstärkung*

Von ACCEL, Nexans und anderen Partnern wurde ein 10 kV, 10 MVA-Demonstrator entwickelt und im Labor getestet, der auch ein Jahr im RWE-Netz eingesetzt war. Er verwendet Leitelemente aus BSCCO-Massivrohr (Durchmesser 50 mm, Wandstärke 4 mm), aufgelötet auf ein Rohr aus Widerstandsmaterial als Shunt mit 2,9 mm Wandstärke und mechanisch verstärkt mit faserverstärktem Kunststoff. Auch hier ist zur Vermeidung von „hot spots“ eine parallele Shuntschicht notwendig. Durch spiralförmige Schnitte im Rohr entsteht ein bifilarer Strompfad von 54 m Länge. Je Phase sind drei Elemente in Reihe geschaltet, so daß sich für 10 kV ein bezogener Wert von 0,62 V/cm errechnet. Die kritische Stromdichte des HTSL liegt bei 77 K bei ca.  $1\ \text{kA/cm}^2$ . Da hiermit, wie bereits Anfang der 90er Jahre durch Simulationsrechnungen vorausgesagt wurde, kaum eine Begrenzungswirkung erzielt wird, wurde die Betriebstemperatur auf ca. 65 K festgelegt, d.h. das Kühlmittel Flüssigstickstoff wird bei Unterdruck betrieben. Dort liegt die kritische Stromdichte bei ca.  $3,5\ \text{kA/cm}^2$ , somit liegt der Querschnitt nur bei 1/4 bis 1/3, was den Widerstand des Supraleiters beim Quench (Heizleistung) entsprechend erhöht und die zu erwärmende Masse reduziert. Damit konnte in Schaltversuchen an Komponenten eine Begrenzung auf den ca. 9-fachen kritischen Strom erreicht werden.

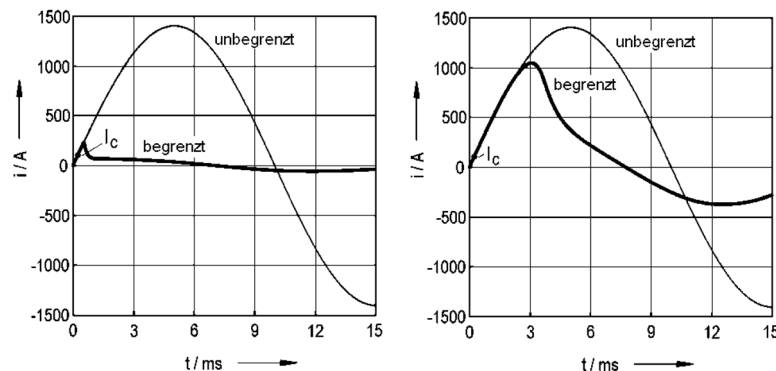


Bild 7: Simulierter begrenzter Stromverlauf und unbegrenzter Strom beim Strombegrenzer mit YBCO-Dünnschicht- (links) und mit BSCCO-Massivleiter (rechts)

In Bild 7 sind diese Abläufe anhand von Simulationsrechnungen an Modellordnungen verdeutlicht. Die Modellrechnungen bilden den Stromfluß und den Erwärmungsvorgang in guter Übereinstimmung mit den Experimenten nach.

Das unterschiedliche Oberflächen-Masse-Verhältnis der beiden Varianten macht sich auch bei der Wiederabkühlung nach erfolgter Begrenzung bemerkbar. Mit Dünnschicht/Substrat-Anordnungen sind Rückkühlzeiten unterhalb einer Sekunde möglich. Sie gelangen damit in die Größenordnung der AWE-Zyklen (Automatische Wiedereinschaltung nach Kurzschlußabschaltung). Hingegen sind die Rückkühlzeiten von Massivmaterial weitaus höher, im Bereich einiger 10 Sekunden.

Nach diesem Verhalten scheint die Dünnschicht-Variante einige Vorteile im Hinblick auf die Anwendung aufzuweisen. Ihr Hauptnachteil besteht darin, daß die Materialien und das Herstellverfahren dazu sehr teuer und noch im Versuchsstadium sind, während es sich beim Massiv-BSCCO um bereits kommerziell verfügbares, kostengünstigeres Standardmaterial handelt.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Betriebsmittel für Stromversorgungsnetze in HTSL-Technologie weisen gegenüber der konventionellen Technik eine Reihe von Vorteilen auf, die sie für einen baldigen Einsatz in besonderen Fällen geeignet machen. Am ehesten wird dies nach Einschätzung vieler Fachleute vermutlich bei Kabeln und Strombegrenzern zunehmend der Fall sein. Bei elektrischen Maschinen werden es eher kleinere Maschinen für Antriebe, z.B. Schiffe, als Großgeneratoren sein, deren Entwicklungskosten enorm sind.

Da die Anwender, hauptsächlich die Energieversorgungsunternehmen, in erster Linie die Kosten im Auge haben müssen, die Erforschung und Entwicklung neuer Technologien aber immer mit erheblichen Kosten und Risiken verbunden ist, ist auch die Entwicklung der Supraleiteranwendung in der elektrischen Energietechnik weltweit noch für längere Zeit auf erhebliche öffentliche Förderung angewiesen. Längerfristig wird sich aber die Supraleiter-Anwendung nur dort auf breiterer Basis durchsetzen, wo unter Berücksichtigung des Gesamtsystems Kosten eingespart werden können oder wo die neue Technik erhebliche weitere Vorteile und Zusatznutzen erbringt.

### **Literatur**

- [1] LINDMAYER, M. & J. GRUNDMANN: Hochtemperatur-Supraleiter in Betriebsmitteln der elektrischen Energietechnik – Stand der Forschung. ETG-Tagung Technische Innovationen in Verteilungsnetzen, Würzburg 2005. ETG Fachbericht Bd. 98, VDE Verlag, Berlin/Offenbach 2005.  
Umfangreiche weitere Literatur dort.

Der Vortragende dankt Herrn Dipl.-Ing. Jörn Grundmann für die Mitarbeit am Manuskript

## Sind wir bei der Nutzung sich erneuernder Energiequellen auf dem richtigen Weg?\*

WERNER LEONHARD

Institut für Regelungstechnik, Technische Universität Braunschweig  
Hans-Sommer-Str. 66, D-38106 Braunschweig

Nachhaltigkeit der Energieversorgung durch Nutzung erneuerbarer Quellen ist ein langfristiges politisches Ziel, um die begrenzten fossilen Ressourcen zu schonen und schädliche Emissionen und Rückstände zu vermeiden. Von den jetzt oder künftig erschließbaren Energiequellen –**Wasser, Sonne, Wind, Biomasse, Wellen, Gezeiten, Geothermie und Kernfusion** – hält man in Europa derzeit Windenergie für am ehesten geeignet, im Laufe der nächsten Jahrzehnte einen nennenswerten Beitrag zur elektrischen Energieversorgung zu leisten; die Elektrizitätserzeugung aus Wind ist Stand der Technik und die Einspeisung der Windleistung in das elektrische Netz wird von Vielen als problemlos angesehen. Im Vortrag wird erläutert, daß das im Rahmen des EEG bei uns praktizierte Förderungsverfahren, subventionierte Wind- und Solarleistung prioritär in das elektrische Netz einzuspeisen, nicht zielführend ist und langfristig wenig Aussicht bietet, von fossilen und nuklearen Energiequellen unabhängig zu machen.

Strategien zur chemischen Speicherung des aus natürlichen Quellen erzeugten Stroms wären dem technischen Stand eines Industrielandes eher angemessen und würden zu einer echten Entkopplung von natürlichem Energieangebot und Netzbedarf führen.

---

\* Kurzfassung eines Vortrags gehalten am 11.03.2005 in der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

## Breitband-Infrastrukturen für mobile Mediennutzer\*

U. REIMERS

Institut für Nachrichtentechnik, TU Braunschweig  
Schleinitzstraße 22, D-38106 Braunschweig

Noch im Jahr 1999 saßen Internet-Surfer vor einem stationären PC oder Laptop, der mit dem Web über einen „Draht“ verbunden war. Fernsehzuschauer genossen ihre Lieblingssendungen im Wohnzimmer oder in der Küche mittels „verkabelter“ Empfänger und nur die Radiohörer waren bereits mit Koffergeräten, Taschenempfängern oder Autoradios ausgestattet und damit mobil. Nur wenige Jahre später, heute, surft man per WLAN im Internet in vielen tausend deutschen „Hotspots“, nutzt das digitale Fernsehen (DVB-T) „überall“ und sendet Fotos aus dem Mobiltelefon. Es ist klar zu erkennen: Eine der aktuellsten Entwicklungen in der Welt der Medientechnik ist die zunehmende Relevanz der mobilen Nutzung. Viele von uns besitzen ein Mobiltelefon, das möglicherweise alle zwei Jahre mit einer Verlängerung des Handy-Vertrages ausgetauscht wird – Fernsehempfänger müssen mindestens 10 Jahre halten. Die Geräteindustrie ist darauf angewiesen, uns alle zwei Jahre neue Geräte anbieten zu können, die immer neue Merkmale besitzen – so wandern gerade Digitalkameras in das Handy. Viele Mobiltelefone können bereits Hörfunkprogramme empfangen, und manche kann man zum Surfen im Internet nutzen. Schließlich finden sich Prototypen diverser Handy-Hersteller, die bewegte Bilder darstellen können.

Breitband-Infrastrukturen ermöglichen den Zugang zu Medieninhalten – aber welche von ihnen können was? Der Vortrag versucht, eine gewisse Systematik in die existierenden Netze und die laufenden Entwicklungen zu bringen. Dazu definiert er anfänglich die beiden Termini „mobil“ und „Medien“. Er widmet sich dann den Merkmalen der Mobilfunknetze der Generationen 2,5 und 3 und analysiert ihre Eignung für die Bereitstellung von Mediendiensten. Ein nächster Abschnitt beleuchtet Wi-Fi, WiMAX und ähnliche Systeme, die primär für die drahtlose Anbindung von PCs und Laptops gedacht sind. In der Folge wird die Eignung von Rundfunknetzen für die Bereitstellung von Mediendiensten zu mobilen und portablen Endgeräten untersucht, und schließ-

---

\* Kurzfassung eines Vortrags gehalten am 10.06.2005 in der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

lich werden „hybride Netze“ vorgestellt, in denen die Stärken diverser Netze so kombiniert werden, dass die mobile Nutzung von Medienangeboten in hoher Qualität möglich wird. Das Institut für Nachrichtentechnik ist mit mehreren Forschungsvorhaben auf dem Felde der hybriden Netze tätig, wobei das neueste Übertragungsverfahren aus dem international tätigen DVB-Projekt, nämlich DVB-H(andheld) eine prägnante Rolle spielt.

## Küstenmorphodynamik – Aspekte der Modellbildung\*

WERNER ZIELKE

Institut für Strömungsmechanik, Universität Hannover  
Appelstraße 9a, D-30167 Hannover

Die Küsten, und damit sind nicht nur die Strände sondern auch das Küstenvorfeld, die Wattgebiete und die Flussmündungsbereiche gemeint, befinden sich in einem ständigen Transformationsprozess. Ihre jetzige Gestalt und ihre zukünftige Entwicklung sind das Ergebnis der Wirkung von Wellen, Gezeitenströmungen, dichteinduzierten (Salz-, Süßwasser) Strömungen. Schon die Frage, ob die Küste mehr durch die extremen Sturmereignisse oder durch mittlere Einflüsse gestaltet wird, ist nur standortabhängig und selbst dann sehr schwierig zu beantworten. Antworten aber sind wichtig. Das Küstenvorfeld z. B. hat durch die darin stattfindende Wellendämpfung eine ganz wichtige Schutzfunktion für die Küste. Ob mit einem steigenden Meeresspiegel das Watt wächst oder erodiert, entscheidet über notwendige Schutzmaßnahmen. Ob gebaggerte Schifffahrtswege in den Flussmündungen morphodynamisch stabil sind oder auf unbegrenzte Zeit gigantische Baggermaßnahmen zur Folge haben, kann über die Zukunft eines Hafenstandortes entscheiden.

Küstenmorphodynamik ist ein Beispiel für natürliche Prozesse, die gekoppelt auf extrem unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen ablaufen. Ihre Modellbildung kann, wenn überhaupt, nur als eine Verbindung von empirischem Wissen und physikalisch begründeten Ansätzen erfolgen. Ihre numerische Berechnung setzt hoch auflösende Langzeitmodelle voraus, und Vorhersagen sind ohne eine sorgfältige Modellvalidierung mit Naturmessdaten wertlos.

Im Vortrag werden an Hand ausgewählter Untersuchungsgebiete die Strategie der Modellierung und Validierung sowie die Chancen einer Vorhersage erläutert.

---

\* Kurzfassung eines Vortrags gehalten am 11.11.2005 in der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.



## Mythenkorrekturen\*

BERND SEIDENSTICKER

Terrassenstraße 17 A, D-14129 Berlin

Ziel des Vortrags war es, den in der Literaturwissenschaft noch nicht etablierten Begriff der Mythenkorrektur vorzustellen und mit Beispielen – vor allem aus der deutschsprachigen Literatur der Gegenwart – zu illustrieren.

Der erste Teil des Vortrags diente dazu, den Begriff der Korrektur gegen die Variation abzugrenzen. Denn Mythen sind traditionelle Geschichten, die – anders als heilige Geschichten – nicht in einer geschützten, unveränderbaren Form existieren, sondern immer und nur im Modus der Variation. Allerdings stellt bereits Aristoteles fest, daß der Tragödiendichter die mythischen Stoffe zwar umgestalten müsse, um die höchste tragische Wirkung zu erzielen, daß er dabei die überlieferten Geschichten aber nicht „auflösen“ dürfe, und dieselbe These liegt auch Hans Blumenbergs Definition des Mythos zugrunde, der in der „Arbeit am Mythos“ festhält, Mythen seien „Geschichten von hochgradiger Beständigkeit ihres narrativen Kerns und ebenso ausgeprägter marginaler Variationsmöglichkeit“.

Werden also Elemente des narrativen Kerns einer mythischen Fabel verändert, die den jeweiligen Mythos gleichsam definieren, sollte man nicht mehr von Variation sprechen. Hier bietet sich der im Anschluß an Brechts „Berichtigungen alter Mythen“ vorgeschlagene Begriff der Korrektur an. So korrigieren Kafka und Brecht mit ihren schweigenden Sirenen die kanonische Homerische Version der Geschichte.

Daneben gibt es noch eine zweite Form der Korrektur, die den narrativen Kern unberührt läßt, dafür aber zentrale Figuren einer mythischen Geschichte anders darstellt und bewertet oder die traditionelle Bedeutung eines Mythos ins Gegenteil verkehrt. Solche semantischen Korrekturen ändern gleichsam das Vorzeichen eines Mythos. Albert Camus' „glücklicher Sisyphos“ oder Christa Wolfs Achill „das Vieh“ sind besonders markante Beispiele für semantische Berichtigungen.

---

\* Kurzfassung eines Vortrags gehalten am 11.03.05 in der Klasse für Geisteswissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

Ein konstitutives Moment der Mythenkorrektur besteht in ihrem notwendigen Rückbezug auf vorgegebene Texte. Für das Verständnis der Variation ist die Kenntnis der ‚Vorlage‘ nicht zwingend erforderlich. Die Korrektur lebt dagegen ganz vom kritischen Dialog mit der Tradition, die der Rezipient unbedingt kennen muß, und setzt folglich die Existenz und Kenntnis einer weit verbreiteten Standardversion voraus. Der korrigierende Eingriff – sei es in einen Text oder auch in ein Bild – erzeugt dann ein Moment der Verblüffung; denn er erfolgt (für das Publikum) wider Erwarten: Altvertraute Geschichten und bis zu diesem Moment selbstverständliche mythische Bilder und Konstellationen werden aufgebrochen und außer Kraft gesetzt. Das Vergnügen, das Mythenkorrekturen hervorrufen, resultiert aus dieser paradoxen Struktur: Sie verwerfen die gängige Fassung eines Mythos und enttäuschen damit die Erwartung des Rezipienten. Indem sie aber zugleich eine ‚Berichtigung‘ anbieten, erzeugen sie eine gesteigerte Spannung und belohnen mit neuen Pointen und Perspektiven.

Die Berichtigung der alten Vorlage ist aber natürlich nur die eine Seite der Korrektur. Zugleich eröffnet sie die Möglichkeit, auf der Folie der traditionellen Version neue Denkräume zu schaffen. Den Verwendungsmöglichkeiten des Verfahrens sind keine Grenzen gesetzt. Sie reichen von intertextueller oder parodistischer Spielerei bis zu fundamentaler geschichtsphilosophischer und zivilisationskritischer Konstruktion oder Dekonstruktion. Die jeweilige spezifische Motivation des Anwenders und die Funktion(en) der Mythenkorrektur im Rahmen seiner kreativen Arbeit können nur in detaillierten Einzelinterpretationen analysiert werden. Der zweite Teil des Vortrags stellte deswegen, nach einem kurzen Blick auf die lange Geschichte der Mythenkorrektur, instruktive Beispiele aus der deutschsprachigen Literatur der Gegenwart vor. Im Mittelpunkt standen Mythenkorrekturen von Günter Kunert, Christa Wolf und Heiner Müller.

## Programme und Spuren. Zur Differenz von Natur- und Geisteswissenschaften\*

CLAUS-ARTUR SCHEIER

Seminar für Philosophie, TU-Braunschweig  
Bienroder Weg 80, D-38106 Braunschweig

Die Spur der Differenz von Natur- und Geisteswissenschaften läßt sich zurückverfolgen bis zu den Vorsokratikern, aber erst Demokrit scheint es gewesen zu sein, der sich unter dem Druck der Sophistik genötigt sah, von der Darstellung des Alls, der *panta*, die Darstellung eines dies Ganze gleichsam spiegelnden Teilbereichs als des *mikros diakosmos* abzugrenzen – ein Hinweis darauf, daß wie vor ihm Parmenides, Anaxagoras und Empedokles noch Leukipp einfach von *diakosmos* bzw. *diakosmêsis* gesprochen hatte. Die Rede vom Makrokosmos wird ja erst nötig, wo zugleich ein Mikrokosmos zu denken ist, und das ist für Demokrit, nicht aber schon für Leukipp bezeugt. Hier also, in der Auseinandersetzung mit der Sophistik, beginnt sich das Wissen eigens auch als *Wissenschaft* auszufalten, genauer in der Gestalt von *Wissenschaften*, denn wie das Wissen unbeschadet seines inneren Reichtums immer Eines ist, sind die Wissenschaften von Anfang an viele, weil die Gegenstandsbereiche immer viele sind – und die Wissenschaft sagt, was ihr Gegenstand ist, d. h. sie unterscheidet ihn von anderen, die damit zugleich Gegenstände möglicher anderer Wissenschaften werden. So unterschieden die Griechen zu Ende des fünften vorchristlichen Jahrhunderts gemeinhin von der supra-lunaren die sub-lunare Natur, in dieser vom Unbelebten das Lebendige, darin den Menschen, an ihm vom Körper die Seele usw.

Als in allen Teilen durchgebildetes Ganzes, zwar nicht System im neuzeitlichen Sinn, wohl aber eine Enzyklopädie, zeigt sich das klassische Ensemble der Wissenschaften in den „Abhandlungen“ (*pragmateiai*) des Aristoteles. Kraft einer in der Logik gründenden Methodik, die bis tief in die Neuzeit hinein verbindlich blieb, bestimmt er das Produktionswissen (*poiêsis*) im Blick auf das Handlungswissen (*praxis*), dieses im Blick auf das anundfürsichseiende Wissen (*theôria*) und alle poetischen, praktischen und theoretischen Wissenschaften als hingeordnet auf die erste Wissenschaft. Denn wie jede Wissenschaft als solche die ihrem Gegenstand eigenen Prinzipien und Ursachen in acht nimmt, sind

---

\* Vortrag gehalten am 10.06.2005 in der Klasse für Geisteswissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

Sache der ersten Philosophie oder Wissenschaft die ersten Prinzipien und Ursachen, von denen her alle übrigen erst sind, was sie sind, nämlich Anfangsgründe anderer Wissenschaften.

Obwohl also die charakteristisch menschlichen Gegenstandsbereiche von Poetik und Rhetorik, Ethik und Politik genau unterschieden werden von denen der Naturwissenschaft (einschließlich der Traktate über Seele und Seelenleben), kann hier trotz der seit der Sophistik geläufig gewordenen Oppositionen von Technik und Natur bzw. Gesetz und Natur keine metaphysische Differenz von Geistes- und Naturwissenschaften konstatiert werden. Denn zu deren Brisanz gehört die Unvermittelbarkeit, das gesprächslose Gegenüber nach C. P. Snows erfahrungsreichem *Aperçu* der „two cultures“.<sup>1</sup> Von den Demokritischen „Kanones“ bis zu Hegels „Wissenschaft der Logik“ spannt sich hingegen ein geschichtlicher Bogen der Vermittlung *im Prinzip*, der auch den stoisch-monothelistischen Erben der klassischen Vernunft (*noys*), den Geist, nirgendwo – vielleicht (und interessanterweise) gewisse gnostische Vorstellungen ausgenommen – zum Gegenspieler oder zweieiigen Zwilling der Natur werden läßt. Das christliche Dogma von der leiblichen Auferstehung formuliert die Untrennbarkeit theologisch, und wenn zuletzt Hegels „Enzyklopädie“ das System der *philosophischen* Wissenschaften ist, dann werden sie nur noch einmal und durchaus traditionell von den *artes mechanicae* unterschieden, nur daß diese im Zug der neuzeitlichen Transformation der *artes liberales* inzwischen ihrerseits den Status von Wissenschaften erlangt haben.

Von dieser geschichtlichen Warte aus drängt es sich wohl auf, zu erwägen, ob es sich bei der berufenen Differenz nicht um ein nahe genug liegendes *Quidproquo* handelt und die zwei „Kulturen“ vielmehr die seit der Industrialisierung allenthalben konfligierenden „Einstellungen“ einer primär „humanistischen“ und einer primär technisch-industriellen Weltsicht à la *homo faber* sind<sup>2</sup> – nicht nur Heideggers Analyse des „rechnenden“ Grundzugs der modernen (quantifizierenden) Wissenschaften, auch die als Technokratie hier und Technikfeindlichkeit da einander proskribierenden Optionen sprächen dafür, die den politischen Alltag bis heute und nicht ganz selten auf gewalttätige Weise mitbestimmen.<sup>3</sup>

Gewiß. Es dabei bewenden zu lassen, hieße das Problem freilich in einer geisteswissenschaftlichen Phänomenologie der industriellen Lebenswelt neutrali-

<sup>1</sup> C. P. Snow: *The Two Cultures: and A Second Look. An Expanded Version of the Two Cultures and the Scientific Revolution*, Cambridge 1965 (Part I: 1959).

<sup>2</sup> Der Naturwissenschaftler erschiene hier, wie in so vielen populären Romanen und Filmen, nur als die sozusagen schamanistische Variante des geheimnislosen Ingenieurs.

<sup>3</sup> Vgl. die Dokumentation über den Ökoterroristen Ted Kaczynski: Lutz Dammbeck: *Das Netz – die Konstruktion des Unabomers*. Mit einem Anhang: *Die industrielle Gesellschaft und ihre Zukunft*, Hamburg 2005.

sieren, die nur noch die Mühe hätte, sich von einer Gesellschaftswissenschaft abzusetzen, deren statistische Verfahren geeignet sind, die betreffende Lebenswelt als eine *zweite Natur* exakt zu inventarisieren. Damit aber wäre die theoretische Frage durch eine pragmatische Antwort weniger aufgelöst als stillgestellt. Denn pragmatischerweise sollte immer die Rede sein von “vernünftigen Kompromissen”, deren Vernunft eben darin liegt, das theoretische Tertium non datur praktisch zu unterlaufen. Die pragmatische Kontaktaufnahme zwischen Geistes- und, nun präzise, weil eine Differenz im Wissen selbst anzeigend: *Naturwissenschaften* (und nicht nur Techniken oder Technologien) läuft darum jeweils auf die Suspension der Theorie hinaus, die sich auf den status quo verwiesen sieht: Zwar bleiben Geistes- und Naturwissenschaften *theoretisch* durch eine Kluft getrennt – zwei “Kulturen” –, aber *praktisch* können und müssen sie sich jeweils arrangieren.

Es kann deshalb gefragt werden, ob die “vernünftigen Kompromisse” nicht auch darin vernünftig sind, daß sie *an sich* auf geschichtliche Veränderungen des theoretischen Horizonts selbst verweisen, die sehen lassen, wie die Suspension der Ausschließung des Dritten auch de facto zuletzt nur möglich ist, weil die alte Opposition de jure ihrerseits bereits porös geworden ist. Dafür, daß es sich in der Tat so verhält, hat der Hinweis auf Jean-François Lyotards 1979, genau zwanzig Jahre nach C. P. Snows Essay erschienenen “Bericht über das Wissen”: “La condition postmoderne” vermutlich immer noch einige Aktualität.<sup>4</sup> Aber abgesehen davon, daß ein Vierteljahrhundert inzwischen auch am Status der Wissenschaften als solcher keineswegs spurlos vorbeigegangen ist, erscheint Lyotards scharfsichtige Bestandsaufnahme im Rückblick notgedrungen selber noch sehr pragmatisch, und auch mit der wiewohl überaus populär gewordenen Rede von der “Postmoderne” kann es auf die Dauer kaum ein Bewenden haben.

Lyotards Thema ist die seit dem Ende des zweiten Weltkriegs immer fühlbarer gewordene Selbstauflösung der ganzen seinerzeit gern unter dem Titel “Metaphysik” apostrophierten Tektonik der begrifflichen Oppositionen, wie sie die industrielle Moderne markierten. Lyotard selbst bevorzugt zwar, und durchaus in polemischer Absicht, den Titel “Moderne”, der aber der namentlich von Heidegger und Derrida in Auseinandersetzung mit Husserls Krisis-Schrift gedachten Metaphysik kompatibel bleibt: Die De(kon)struktion gilt der Verfassung des wissenschaftlichen Denkens seit Galilei, Descartes und Leibniz, das jeweils in der Kontinuität einer Geschichte vorgestellt wird. Diese Konstruktion ist bestreitbar und fordert im Sinn ihrer Verfechter selber zu einer kritischen Genealogie des philosophischen Denkens *einschließlich* jener Gestalten der De(kon)struktion heraus. Näher zum Thema der beiden “Kulturen” wäre in post-

<sup>4</sup> Jean-François Lyotard: La condition postmoderne. Rapport sur le savoir, Paris 1979 (dt. Das postmoderne Wissen, Graz u. a. 1986).

moderner Optik jedenfalls zu erwarten, daß sie sich, wenn schon nicht in Antike und Mittelalter, so doch spätestens seit dem 17. Jahrhundert gegeneinander differenzieren.

Zu einer solchen Unterstellung macht freilich auch das 18. Jahrhundert denkbar wenig Mut, und noch Hegels Einteilung der Realphilosophie in Naturphilosophie und Philosophie des Geistes gründet in der Einen Methode der „Wissenschaft der Logik“ und zielt nicht auf eine Differenz methodischer „Einstellungen“. Der Befund macht vielmehr deutlich, daß die Konfrontation von Natur- und Geisteswissenschaften weder metaphysischer Herkunft noch auch nur metaphysik-analogen Gepräges ist: Sie gehört von Grund auf zum Gestus der industriellen Moderne und bringt in der Tat wissenschaftliche Einstellungen ins Spiel, die innerhalb der Metaphysik weder nötig noch auch nur möglich waren. Es darf mithin nicht außer acht gelassen werden, daß die fraglichen „Geisteswissenschaften“ erst im 19. Jahrhundert entstehen und ihren Anspruch auf Wissenschaftlichkeit dadurch einlösen, daß sie nicht minder „positiv“ verfahren als die längst durch ihre unübersehbaren Erfolge sanktionierten Naturwissenschaften. Diese Positivität besteht nun negativ gewendet darin, rein empirisch, d. h. keineswegs ohne methodenkritisches Rüstzeug – die metaphysischen Methodentraktate, so zuletzt Hegels „Wissenschaft der Logik“, werden abgelöst von der Wissenschaftstheorie –, wohl aber ohne metaphysische Substruktur, d. h. nicht onto-theo-teleologisch zu arbeiten.

Hatte Hegel noch einmal die Vielfalt der Wissenschaften metaphysisch in das Eine Wissen oder *die* Wissenschaft „aufgehoben“, dann sind dessen Nachfolger die Weltanschauungen und alsbald die Ideologien, Simulationen der als die wahren Erben übriggebliebenen positiven Wissenschaften (im Pluraletantum). Irreduzible Pluralität, weil demzuvor irreduzible Differenz ist die Signatur der industriellen wie der postindustriellen oder medialen Moderne überhaupt. Zur radikalen Differenz gehört aber, darauf hat Lévinas eindringlich hingewiesen, die Asymmetrie, die sich im Fall des Verhältnisses von Natur- und Geisteswissenschaften sogleich darin erweist, daß diese ihre Wissenschaftlichkeit an jenen messen und nie umgekehrt. Mit andern Worten: die wissenschaftliche Dignität der Geisteswissenschaften war von Anfang an prekär und ist es bis heute, wo sie sich als solche verabschieden, geblieben.

Es leuchtet wohl ein, daß dies nicht allein an der fraglichen Nützlichkeit, d. h. letztlich an der minderen Popularität oder Aura der Geisteswissenschaften liegen kann. Daß ihrer positivistischen Schieflage also nie recht abgeholfen werden konnte, muß ein versteckteres Motiv haben, das nach allem nur auf jenem philosophischen Niveau aufzufinden sein kann, auf dem Hegels Realphilosophie die Extreme von Natur und Geist zusammenhielt, auf dem Niveau der Logik selbst. Denn die Moderne ist, wie schon das frühe Denken im Horizont der Industrialisierung deutlich macht, derart radikal von der vormaligen

Metaphysik und ihrem Produktionsparadigma der Handwerklichkeit verschieden, daß beide nicht einmal mehr, und wieder gegen den Anschein geschichtlicher Kontinuität, den Boden der Logik gemeinsam haben. Freges "Begriffsschrift" formalisiert gegen Ende der siebziger Jahre des 19. Jahrhunderts nur, was sich schon längst ereignet hat: die Transformation der klassischen Logik der Copula oder des Grundes, der platonisch-aristotelischen „Mitte“ (*meson*), in die mitte-lose Logik der Funktion. In dieser Tat und nicht in der Bereitstellung eines, wie immer nützlichen, "für bestimmte wissenschaftliche Zwecke ersonnene[n] Hilfsmittel[s]"<sup>5</sup> liegt Freges geschichtliche Bedeutung. Bestand die über zwei Jahrtausende fortwirkende Kraft des metaphysischen Logos in der immer neu ins Werk gesetzten Gewißheit, daß die Differenz von Subjekt und Prädikat bzw. von Subjekt und Objekt zurückzudenken sei in die produktive Einheit des in der Copula, im "Sein", vorscheinenden Prinzips, wie es der deutsche Idealismus zuletzt "das absolute Subjekt-Objekt" nannte, dann setzt die beginnende Industrialisierung dagegen ihr Tertium non datur von Funktion und Argument: Die Welt selbst ist grundlos geworden.

Und hier, will mir scheinen, springt die logische Konstitution der asymmetrischen Differenz von Natur- und Geisteswissenschaften geradezu in die Augen. Denn diese das Denken der gesamten industriellen Moderne, also bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts im Sinn eines Entweder-Oder bestimmende ontologische Differenz von Funktion und Argument war zugleich das Programm aller in das Begriffspaar einzutragender Oppositionen (naturwissenschaftlich vs. historisch, Erklären vs. Verstehen,<sup>6</sup> nomothetisch vs. idiographisch, hart vs. weich etc.): Die „Argumente“ der Naturwissenschaften waren funktionalisierte Gegenstände, die der Geisteswissenschaften gegenständliche bzw. vergegenständlichte Funktionen. Und darin gründet unmittelbar auch die Asymmetrie der beiden "Kulturen" wie der wissenschaftstheoretische Primat der Naturwissenschaften. Die geisteswissenschaftlichen Gegenstände sind ihrer Konstitution nach nie "rein", sondern immer schon Funktionen für Funktionen, so daß diese Wissenschaften – wie die deutsche Bezeichnung "Geisteswissenschaften" genugsam kundtut – in einem Medium (relativer) Identität beheimatet sind, die den Schein der Kontinuität mit der metaphysisch gedachten Identität nie ganz abzustreifen vermag. C. P. Snow kann ihre Kultur deswegen auch schlicht "traditional culture" nennen (und positiv gewendet sind sie in der Tat die Baustelle des modernen kulturellen Gedächtnisses). Die Naturwissenschaften hingegen haben es immer mit dem zu tun, was die Funktion ursprünglich, nach dem plastischen Ausdruck Freges, "sättigt" – mit dem vermittlungslos *anderen* der

<sup>5</sup> Gottlob Frege: Begriffsschrift und andere Aufsätze, 3. Aufl. Mit E. Husserls und H. Scholz' Anmerkungen hrsg. von Ignacio Angelelli, Darmstadt 1974, S. XI [V].

<sup>6</sup> Vgl. die kritische Darstellung in Ute Daniel: Kompendium Kulturgeschichte. Theorien, Praxis, Schlüsselwörter, Frankfurt a. M. 32002, S. 400-409.

Funktion. Und auch dies gehört wesentlich und von Anfang an zur Signatur der Moderne: wie die Zeit der Metaphysik die Kultur des Selben (*to ayto*) war, ist die Moderne die Kultur des anderen (nicht *to heteron*, sondern *to allo*).

Heidegger verstrickte sich also keineswegs in den Sprachgarnen eines privat-mythologischen "Seins", wenn er unbeirrt auf der Bedenklichkeit der ontologischen Differenz beharrte: Sie ist die "seinsgeschichtliche" Abbräviatur der Moderne schlechthin, wobei die geheimnisvolle Seinsgeschichte sich im Licht der Logik erweist als die Geschichte der nicht bloß formal-logisch, sondern metaphysisch – als Grund – gedachten Copula und ihres modernen Entzugs. Wider den Strich gleich zweier philosophischer Traditionen und Selbstvergewisserungen, der analytischen wie der hermeneutisch-phänomenologischen, ist es daher ebenso legitim wie heuristisch fruchtbar, "ontologische Differenz" und "Satzfunktion" zusammenzudenken. Sichtbar wird dann nämlich, wie die irreduzible Differenz, die im 19. Jahrhundert und noch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gegen das zum Schein gewordene Identitätsprinzip der Metaphysik, den „Grund“, in allen Schattierungen von *Ab-Gründigkeit* gedacht worden war, nunmehr in der zweiten Jahrhunderthälfte als solche zum *Feld* des im weiteren wie im engeren Sinn philosophischen Denkens wird.

Gemeinsam ist all diesen Bemühungen, daß sich die vormals gleichsam solide Differenz in ihrer Funktionalität nun selber ins Unabsehbare differenziert und, so oder so, beschrieben wird als Sprachfeld. So entzieht sich Derridas Formel „Der Text hat kein Außen“<sup>7</sup> dem lebensweltlich-szientifischen Verständnis kaum weniger entschieden als Heideggers Gnome „Die Sprache spricht als das Geläut der Stille“,<sup>8</sup> und allerdings denken beide wo nicht in das Selbe, so doch in dieselbe Richtung. Wenn Heidegger neun Jahre später entdeckt, das „Wesende der Sprache“ sei „die Sage als die Zeige“,<sup>9</sup> dann erweist sich sein „Weg zur Sprache“ als Weg in die „Stille“ der Schrift, Derridas *écriture*. Denn der „Aufriß ist die Zeichnung des Sprachwesens“ und „Riß ist dasselbe Wort wie ritzen“.<sup>10</sup> Heideggers Denken gelangt damit der eigenen Schwerkraft folgend genau in die Gegend, die in denselben Jahren vom Strukturalismus exploriert wird – und auch schon an deren Grenze, die ihrerseits vom „Poststrukturalismus“ erkundet werden wird.

Sollte es dabei nun nicht, wie der in seine Tagesordnungen verliebte Allverstand auch heute noch gern zu Protokoll gibt, um verantwortungslose Absonderlichkeiten und akademisch-narzißtische Sprachspiele handeln, dann müßte diese sich selber differ(enz)ierende Differenz des Sprach- bzw. Informa-

<sup>7</sup> Jaques Derrida: *De la grammatologie*, Paris 1967, S. 227: *Il n'y a pas de hors-texte*.

<sup>8</sup> Martin Heidegger: *Die Sprache* (1950), in: *Unterwegs zur Sprache*, Pfullingen 1959, S. 30.

<sup>9</sup> Heidegger: *Der Weg zur Sprache* (1959), a. a. O., S. 254.

<sup>10</sup> Ebd., S. 252.



tionsfelds, die Derrida mit zugegeben provokanter Vorsicht *différance* genannt hat, allenthalben auch in den Wissenschaften selber - und selbstverständlich unter anderen Terminologien - aufweisen lassen. Daß die postpositivistischen Biowissenschaften den genetischen Code entschlüsseln und reproduktive Programme beschreiben, mag wohl, wie viele ihrer Vertreter behaupten, eine *façon de parler* sein, aber gerade als *façon de parler* verweist es darauf, daß die Naturwissenschaften insgesamt sich in der geschichtlichen Lage nach der Katastrophe der "Protokollsätze" des Wiener Kreises zunehmend darauf einrichten, den Status von Modellen zu haben, die unhintergebar sind auf irgendeine Natur an sich (wie es die neurobiologische Forschung ohnehin seit längerem propagiert und popularisiert). Das muß keineswegs, wie es nostalgischerweise scheinen könnte, den resignativen Zug eines sich Bescheidens haben, sondern verweist vielmehr auf neue, noch kaum ausgeschöpfte heuristischen Potentiale.

Logisch gesprochen bedeutet es einfach genug: das nackte Argument ist nicht zu haben – es ist immer schon Argument-seiner-Funktion<sup>11</sup> und weiter: selber schon Funktion eines tieferliegenden Arguments usw. Die "Familienähnlichkeit" mit den Geisteswissenschaften wird hier augenfällig. Daß diese ihrerseits, soweit ich sehe, nicht auf der Suche nach historischen *Programmen* sind – hierin vermutlich von den Gesellschaftswissenschaften im engeren Sinn unterschieden –, sondern eher auf einer – wiederum im Unterschied zur Kunst: - methodisch gesteuerten *Spurensuche*, wird wohl an dem bereits angedeuteten Unterschied von natürlicher und geschichtlicher Evolution liegen. Die Geschichte der menschlichen Kultur ist immer auch die Geschichte des Bewußtseins, und Bewußtsein ist, formelhaft gesagt, das *Fürsichsein der Differenz*. Insofern haben die gegenwärtigen Geisteswissenschaften den Naturwissenschaften gegenüber die Schwierigkeit, jederzeit zu tun zu haben mit der Differenz als Differenz, die, soll sie nicht in einem verzweifelt an sich festhaltenden Positivismus selber als Argument simuliert werden, nur zu beschreiben ist als Spur und also – auch bereits eine ein halbes Jahrhundert alte Einsicht – als Spur von Spur usw.

Indem sich also in der ihrer selbst bewußt werdenden medialen Moderne die Wissenschaften insgesamt ihres "postmodernen" Status bewußt werden, der nach allem der post-positivistische Status der seit zwei Jahrhunderten nicht mehr metaphysischen Wissenschaften ist, entdecken sie ihren gemeinsamen Modellcharakter. Sie sind damit allerdings auf dem geschichtlichen Weg zu jener "Einheitswissenschaft", von der der Wiener Kreis noch hinreichend naiv geträumt hatte. Gegen die langsam spürbar werdende befremdliche Gestalt, die sie darüber anzunehmen begonnen haben – auch in der unaufhaltsamen Speziali-

<sup>11</sup> Die Quantenmechanik hat dem schon früh dadurch Rechnung getragen, daß ihr Gegenstand nicht traditionell das Gemessene, sondern die unhintergebbare Dyade Messung-Gemessenes, d. h. die intentionale als die durch den sog. Beobachter mit-konstituierte Verfassung ihre Gegenstands ist.

sierung, Technisierung und Technologisierung des Wissenschaftsbetriebs und so in der Durchdringung („Vernetzung“) der methodischen Spielräume und Gegenständlichkeitsfelder der vormaligen Natur-, Geistes-, Sozial- und Ingenieurwissenschaften insgesamt – hätten die Vertreter des Wiener Kreises aber vermutlich aufs schärfste protestiert. Wittgenstein war wohl, nach Nietzsche, einer der wenigen, die damals schon gesehen haben, daß der alte Unterschied von „Natur“ und „Geist“, Erbe der vormaligen Metaphysik, irgendwann nurmehr lebensweltliche Bedeutung haben würde.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> Die Absorption der klassischen Geistes- in die aufsteigenden Erziehungswissenschaften (educational sciences) ist bereits Lyotard in den Blick gekommen (vgl. das 12. Kap. der „Condition postmoderne“: „Die Erziehung und ihre Legitimation durch die Performativität“). Kompensiert wird diese performative Absorption durch die Institutionalisierung interdisziplinärer Forschungszentren mit „geisteswissenschaftlichem“, z. B. anthropologischem, numismatischem, papyrologischem Schwerpunkt.

## Die frühmittelalterlichen Siedlungsräume an Oker und Schunter aufgrund archäologischer und archäometrischer Quellen im Überblick\*

HARTMUT RÖTTING

Lobmachersche Straße 18, D-38312 Cramme

Auf der rund fünf Meter höheren östlichen Niederterrasse am Ufer der Oker, nördlich der alten Wolfenbütteler-Heinrichsstadt, sind zwei frühmittelalterliche Siedlungen des 9. und 10. Jahrhunderts auf den Flächen des Rothen Vorwerks und im Umkreis des Schweden-Dammes 1991 entdeckt worden. Unter den rund 500 Funden an Keramikscherben, Knochen, Stein- und Metallfragmenten, die im Rahmen von Feldbegehungen aufgenommen werden konnten, befinden sich Randformen von Tongefäßen, wie sie auch zeitentsprechend für Braunschweig und anderenorts, z.B. aus Schichten unterhalb der Hauptkirche in Wolfenbüttel bzw. im Grab 1 von Schöppenstedt (Abb. 9, Datierung 4. Viertel 8. Jh.) an der Oker und Schunter vorliegen. Diese frühmittelalterlichen Siedlungsvorgänge des 9. und 10. Jahrhunderts stehen zeitlich und funktionell im unmittelbaren Vergleich zu den Braunschweiger Ufersiedlungen, die auf den beiden Niederterrassen angelegt wurden (Abb. 4–7): nämlich auf der westlichen Niederterrasse im Raum Kohlmarkt und Eiermarkt/beiderseits der Turnierstraße wie im Raum der nachmaligen Brüdernkirche und ebenso auf der östlichen Niederterrasse im Raum Alte Wiek/Magni-Kirche bzw. Aegidienhügel (Rötting 1985, 1997<sup>2</sup> u. 2002).

2004 ist im Gebiet des Schloßbaugeländes (Alte Wiek) im Rahmen der vorbereitenden archäologischen Untersuchungen eine neue Siedlungsstelle an der Friesenstrasse entdeckt worden (Michael Geschwinde).

An der Schunter sind erste Burgstellen (Abb. 1 und 10) bislang an drei Orten archäologisch untersucht worden (Kretzschmar 1997), nämlich die Burgstellen

---

\* Kurzfassung eines am 14.10.2005 mit 33 Folien gehaltenen Vortrags in der Klasse für Geisteswissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft. Eine erweiterte Fassung wird jeweils in den zukünftigen Veröffentlichungen zu den Ergebnissen der Ausgrabungen in Salzgitter-Burg Lichtenberg, Goslar-Pfalz und Königsutter Stiftskirche St. Peter und Paul erscheinen. Die zunächst relativ bestimmten, chrono-stratigraphischen Schichtbefunde in Verbindung mit dem typologisch zu ordnenden Sachgut sind interdisziplinär absolut-chronologisch mit Hilfe der <sup>14</sup>C- bzw. der dendrochronologischen Methode zeitlich zu präzisieren.

Lüersburg (Rötting 1983) und Süpplingenburg (Grabung Hecht, Abb. 8) und neuerdings auch der Burgwall von Querum (M. Geschwinde).

Für die Beurteilung der Siedlungssituation an Oker und Schunter sind die zahlreichen Gräberfelder, die in den Fluren Remlingen und Werlaburgdorf archäologisch untersucht werden konnten, von entscheidender Bedeutung: ihr Belegungszeitraum beginnt mit dem späten 8. Jahrhundert und setzt sich räumlich fort beiderseits der alten Heerstraße nach Schöningen (Abb. 1). Es handelt sich um die frühmittelalterlichen Friedhöfe von Remlingen (Reihengräberfelder „Am Ammerbeek“ und „Spielberg“), von Schöppenstedt, von Schöningen sowie westlich der Oker von Werlaburgdorf und Braunschweig-Kohlmarkt, die in den Zeitraum ab spätes 8. Jahrhundert, teilweise bis in das 10. Jahrhundert reichend, datiert werden konnten (Rötting 1983, 1985, 1997 und M. Geschwinde,

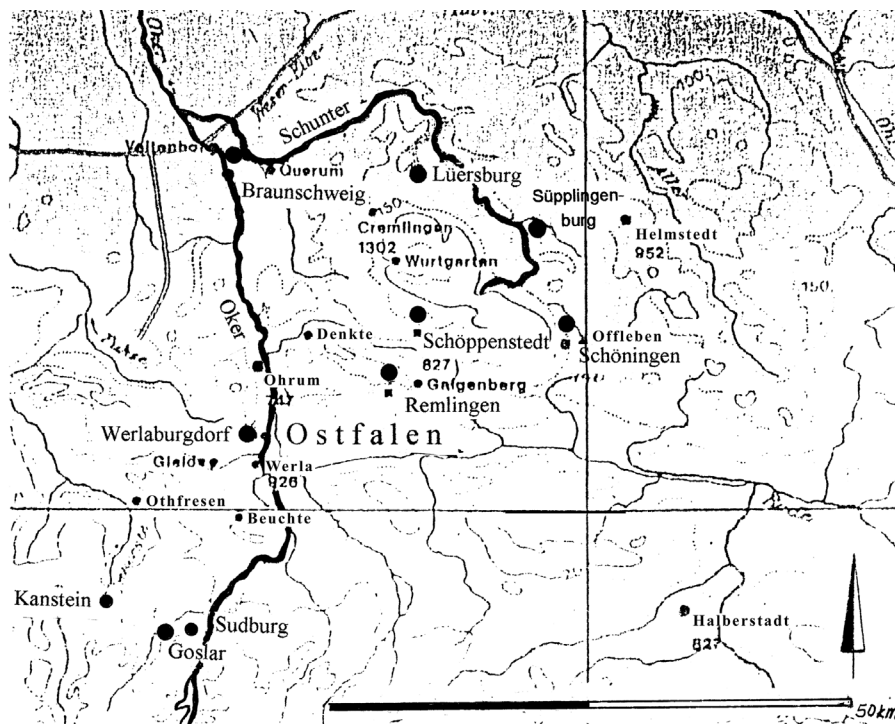


Abb. 1: Übersichtsplan: Nördliches Harzvorland mit den Grabungsorten der Jahre 1976–1982 und weiteren Orten zur archäologisch-historischen Frühmittelalterforschung. Der Verlauf der Oker und Schunter ist im Kartenbild herausgehoben. Kartengrundlage: Deutschland, Orohydrographische Ausgabe, M. 1:1000 000, hrsg. 1965 v. Institut für angewandte Geodäsie, Frankfurt/Main (verkleinerter Ausschnitt).

Ausgrabung der Reihengräberfriedhöfe Remlingen „Spielberg“ und Werlaburgdorf „Neubaugebiet“ in den Jahren 2003/2005). Bemerkenswert sind in diesem Zusammenhang die Funde von Halsketten mit transluziden Glasperlen, u.a. mit den sogenannten Mosaikaugenperlen, Millefioriperlen, Schachbrettperlen und grünen, blauen, silbernen oder goldfarbigen, einfachen Glasperlen (Abb. 2 und 3).

Spitz auslaufende Kragenränder (sog. Zipfelränder), die stets an Standbodengefäßen auftreten, sind ab dem späten 8. bis 9. Jahrhundert belegt (Abb. 9.1). In der Weiterentwicklung wird die Randwurzel verdickt und der Standboden ab-

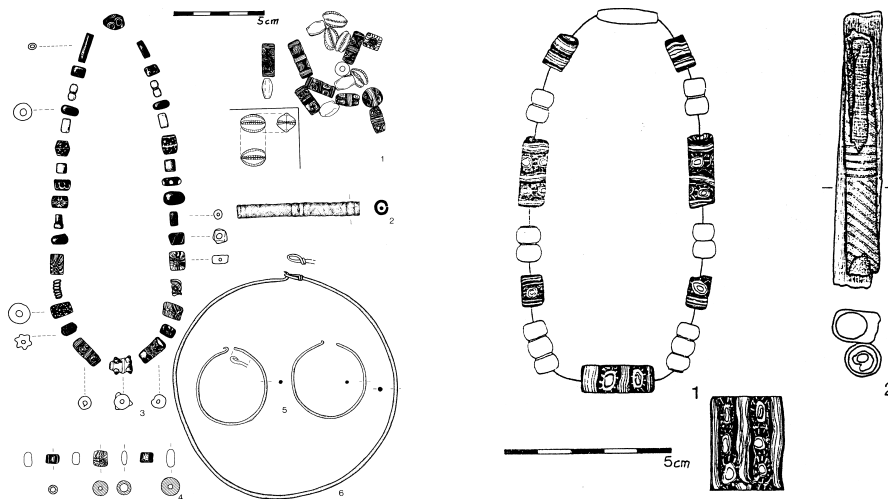


Abb. 2: (links) **Remlingen**, Ldkr. Wolfenbüttel, Ostfälisch-sächsisches Reihengräberfeld „Am Ammerbeek“, 4. Viertel 8. Jh. **1** WO-Grab 27: Fundlage der 18 Glasperlen im rechten Schulterbereich, 8 Mosaikaugenperlen, 1 Schachbrettperle, 3 einfache Glasperlen (grün, blau, silberüberfangen), 2 Bernsteinperlen, 4 Silberblechperlen. Fundnummer 78:11/35. **2** WO-Grab 37: Nadelröhre mit Nadelnadel, Verzierungsmuster: abwechselnd doppelte, ringförmige Profilierung mit flächigem Gittermuster. Eisen, Länge 77 mm, Dm. 9 mm. FNr. 78:11. **4** WO-Grab 45: 7 Glasperlen. FNr. 78:11/116. **5** 2 Ohr- bzw. Schläfenringe aus Kupferdraht, Haken-Ösen-Verschluß, gr. Dm. 46 mm. FNr. 78:11/115. **Schöppenstedt-Küblingen**, Ldkr. Wolfenbüttel,

Reihengräberfeld „Am Sandberg“, 4. Viertel 8. Jh. **3** WO-Grab 1: 34-teilige Halskette aus 33 farbigen Glasperlen und einer Kupferdrahtperle, u.a. Mosaikaugenperlen, Schachbrettperlen, Millefioriperlen, silberüberfangene Mehrfachperlen. FNr. 79:16/9. **6** Halsreif mit Haken und Ösenschnalle aus Kupferdraht, Dm. insgesamt ca. 114 mm. FNr. 79:16/8, vergesellschaftet mit einem Standbodengefäß, vgl. hier Abb. 10.

Abb. 3: (rechts) **Schortens**, Ldkr. Friesland, Plaggestr., früh- bis hochmittelalterliches Gräberfeld mit Brand- und Körperbestattungen sowie Pferdegräbern; insgesamt 701 Grabanlagen: **1** WO-Grab 602 mit Mosaikaugenperlen und „goldfarbigen“ Mehrfachglasperlen. **2** WO-Grab 523 mit Nadelröhre und Nadel.

gerundet (Abb. 6 und 9). In der dritten Stufe der Entwicklung entsteht der Kugeltopf mit einem vollkommen abgerundeten Gefäßunterteil. Das Gefäß konnte zunächst in eine Holzkohlenkuhle gestellt werden, später verwendete man ein Dreibeingestell mit Eisenring.

Grafik: Petra Sowa, Wolfgang Hau

Textverarbeitung: Natascha Stockhaus, Christian Obstfeld M.A.

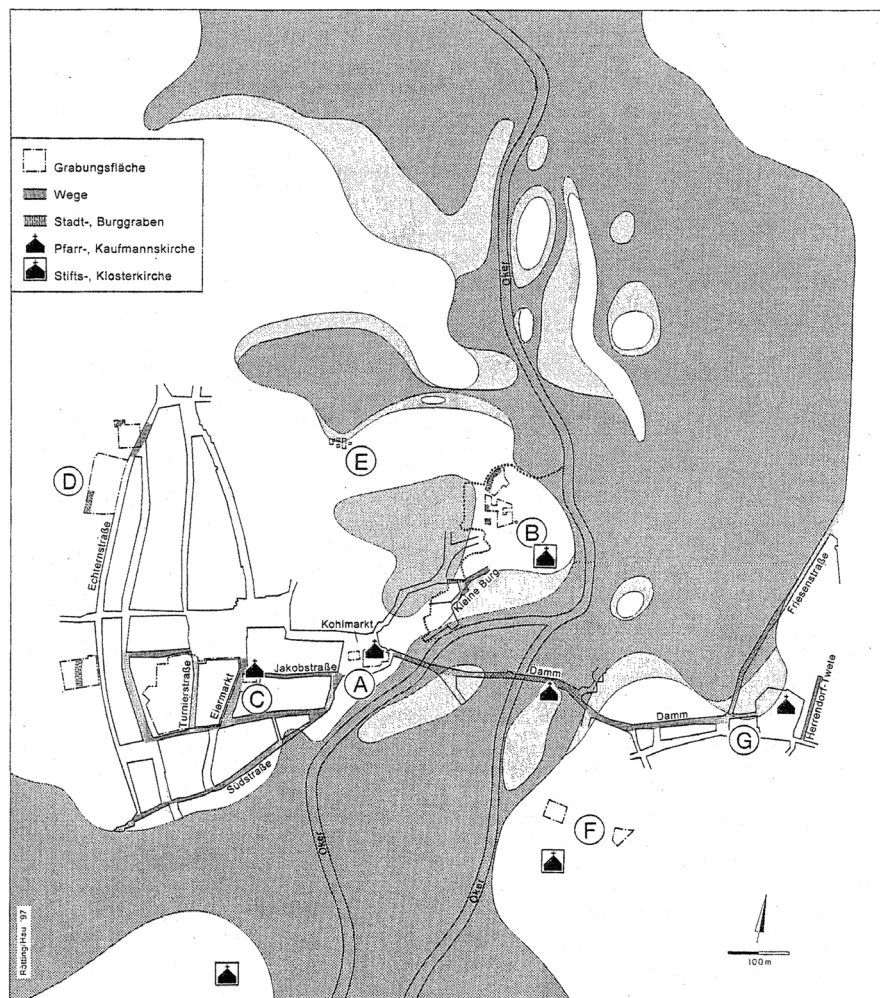


Abb. 4: **Braunschweig-Altstadt, -Alte Wiek.** Siedlungstopographie in den Siedlungsgebieten A–G mit Wegestruktur, Kirchen und Stadtgraben bzw. Burggraben. Grabungsstand 1995.

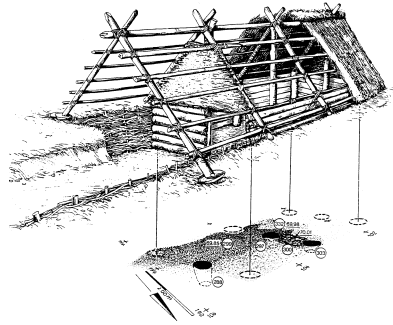


Abb. 5: **Braunschweig**, Altstadt-Kohlmarkt (Stadtgrabung 21). Grabungsbefund und ein Rekonstruktionsversuch zu einem Grubenhaus mit Pfeildach, Firstsäule, Vorhalle und verkämmter Blockwand ohne Vorstoß, aus Halbhölzern und mit Flechtwandgiebel. Befunde: Pfostengruben 288, 297, 303; Feuerstelle aus Granitbruch mit Kugeltopfmulde 300; Holzkohleschleier 299, Eintiefung von ca. 1 m (Oberflächenvergleich) u.a.

Fl 1/LP 1 Schicht	Keramik Sonderfunde	Keramik Sonderfunde	Fl 3 Schicht	Phase	Zeit
32			78	5	bis in die 2. Hälfte 11. Jh.
39/36			80	4	
42			85/130	3	
183			140	3	spätestens um 900 bis um 1000
31/41			140	3	
34			140	3	
35			140	2	spätestens um 900 bis um 1000
			140	2	

1: Schleuderkugel (Ton) 2: Bleiplattenrest 3: Möbelteil 4: Sporenfragment 5: Sandsteinreste (bearbeitet)

M. 1 : 5

Abb. 6: **Braunschweig**, Burgbezirk, Braunschweigisches Landesmuseum, Burgplatz 1 (Stadtgrabung 31). Signifikante Funde der Leitprofilschichten der Fläche 1 und der zeitgleichen Funktionsschichten der Fläche 3 in chronologischer Ordnung.

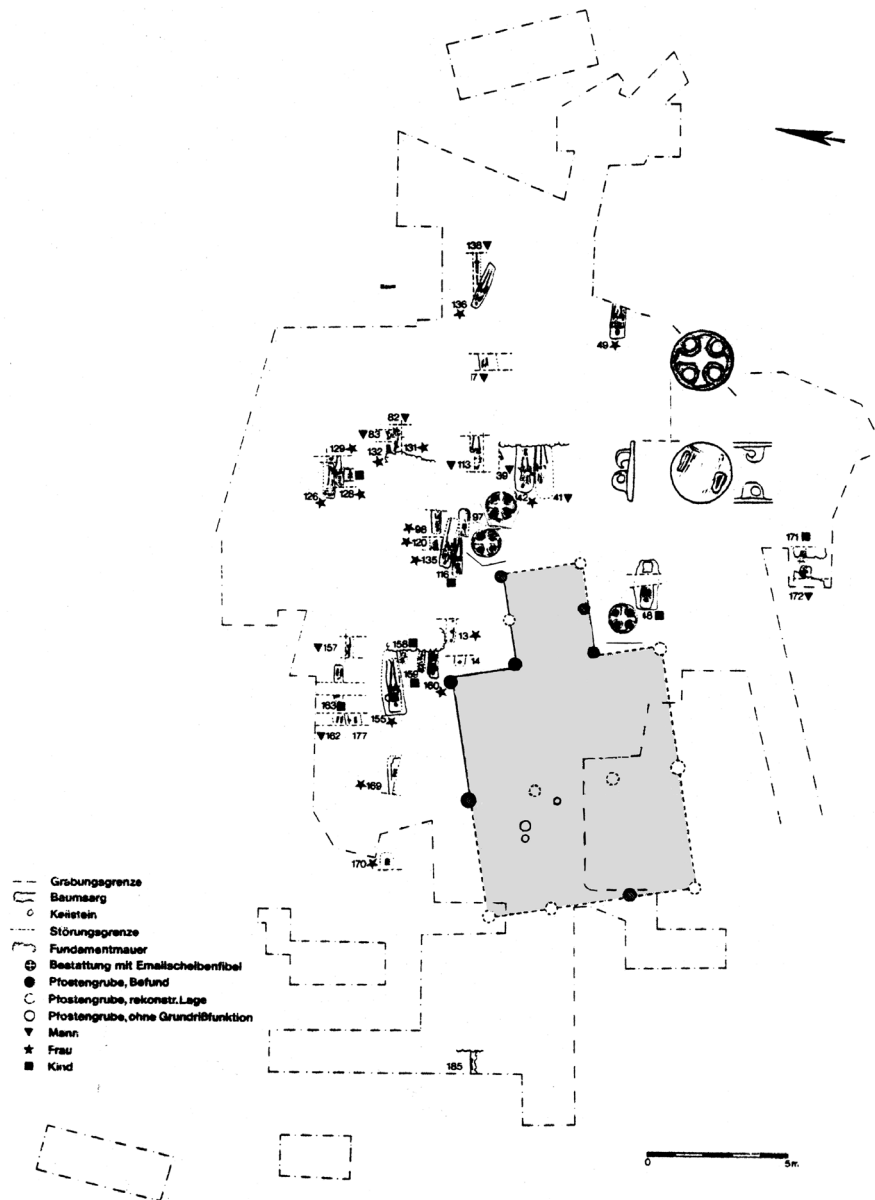


Abb. 7: Braunschweig, Altstadt-Kohlmarkt (Stadtgrabung 21), 1979/80. Grabungsplan (Ausschnitt) mit rekonstruiertem Pfostengrundriß der Holzkirche und mit 36 west-östlich orientierten Körperbestattungen, vorwiegend in Baumsärgen. Bemerkenswert sind die Gräber 42, 48 und 97 mit den Emailscheibenfibeln mit Kreuzsymbol. Datierung um 900 n. Chr.



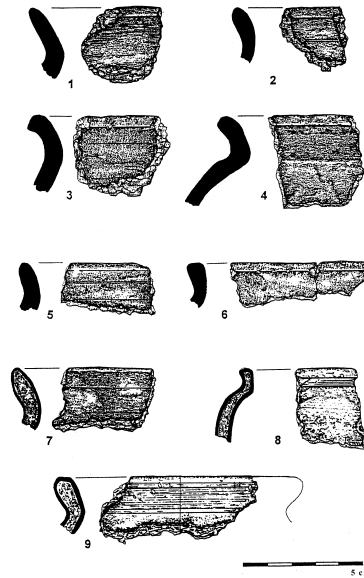


Abb. 8: Randformen der Gefäßkeramik des 9. bzw. 10. Jahrhunderts aus den Grabungen 79:11/**Braunschweig** Kohlmarkt und 85:1 /**Braunschweig** Eiermarkt/Turnierstraße (Stadtgrabung 33). 87:31/**Braunschweig-Leiferde II** (Stadtgrabung 92) sowie, Ldkr. Helmstedt, Kirchengrabung Prof. Hecht 1967/68 (z.B. 4 UNG S/O II). **1** 79:11/873. **2** 4 UNG S/O II. **3** 79:11/908.1. **4** 79:11/879. **5** 79:11/673.2. **6** 85:1/17114.1 u. 2. **7** 4 UNG S/O II. **8** 87:31/213 (Okerniederung/Äcker des Rothen Amtes, Wolfenbüttel). **9** S 68 C4 18. – Die dunkelgrauen Randscherben **1** – **6** sind reduzierend gebrannt, gehören der rauen Granitgrusware an und formal zu den kurzen, teilweise leicht ausbiegenden Kragenrändern. Die Randscherben **7** – **9** sind oxidierend hellrot bzw. fleckig hellrötlich bis dunkelgrau gebrannt, gehören der glatten Quarz-Glimmer-Feinsandware an und sind formal den kurzen Kragenrändern bzw. den gestauchten Wulsträndern zuzuweisen. **9** S 68 C4 18 zeigt am Außenrand sehr engesetzte Drehrillen.

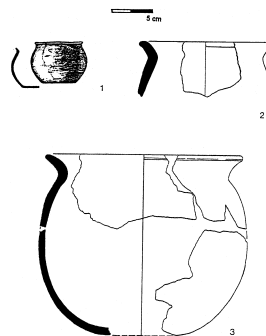


Abb. 9: Frühmittelalterliche Keramik des späteren 8. und des früheren 10. Jahrhunderts. **Schöppenstedt-Küblingen**, Ldkr. Wolfenbüttel, Grabung 79:16, Reihengräberfeld „Am Sandberg“. **1** Grab 1: Kleines Standbodengefäß mit Zipfelrand, rötlich oxidierend gebrannte Irdenware. **Lüersburg**, Ldkr. Helmstedt, Grabung 81:9. Gefäßreste auf der Grabensohle des Wehrgrabens: **2** Randfragment und **3** großes Standbodengefäß mit ausbiegendem Rand, rötlich oxidierend gebrannte Irdenware. FNR. 81:9/5 und 81:9/1-8.

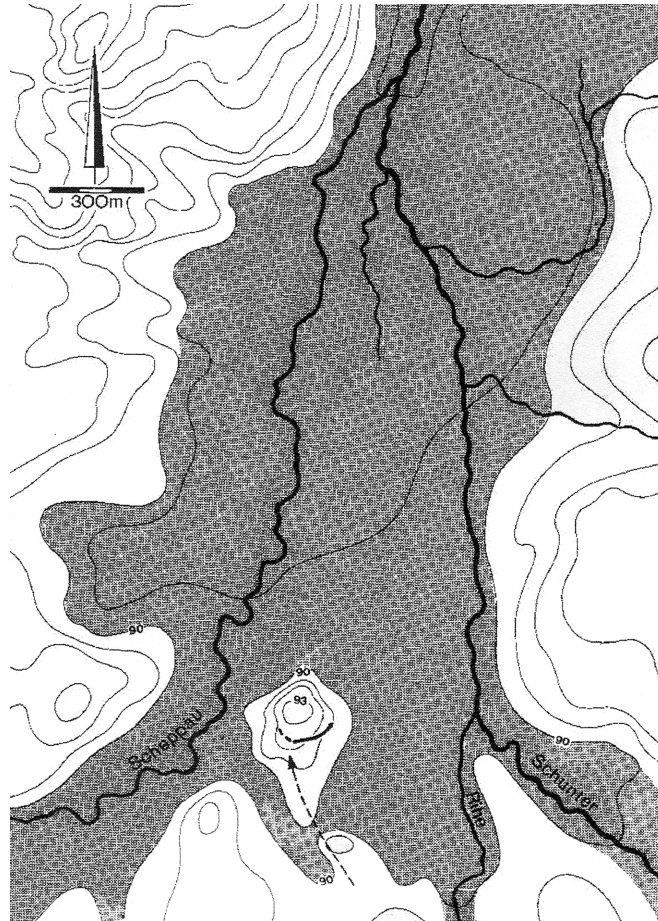


Abb. 10: Lüersburg, Königslutter-Rieseberg, Ldkr. Helmstedt, Grabung 81:9. Übersichtsplan zur Lage der Niederungsburg aus dem früheren 10. Jahrhundert in der Scheppau-Riehe-Schunter-Niederung. Eingetragen ist der Abschnittsgraben mit den beiden Sandbrücken und die vermutete Wegeführung. Karte des Landes Braunschweig im 18. Jh., M. 1:25 000, Bl. 3630 Heiligen-dorf, hrsg. v. d. Historischen Kommission f. Nds. XXIII. 1960.

### Literatur

- BECHER, MATTHIAS (1999): Sachsen vom 6. bis 8. Jahrhundert. In: Über allen Fronten. Nordwestdeutschland zwischen Augustus und Karl dem Großen. Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 26, hrsg. v. Mamoun Fansa, Oldenburg, S. 145 – 161.

- BLUME, HERBERT (2005): Oker, Schunter, Wabe und weitere Flußnamen im Braunschweiger Stadtgebiet. In: Braunschweigisches Jahrbuch für Landesgeschichte, S. 11 – 36.
- KRETZSCHMAR, LARS (1997): Die Schunterburgen. Ein Beitrag der interdisziplinären Forschung zu Form, Funktion und Zeitstellung. Beihefte zum Braunschweigischen Jahrbuch, im Auftrag des Geschichtsvereins hrsg. v. Horst-Rüdiger Jarck, Bd. 14.
- RÖTTING, HARTMUT (1983): Neue archäologische Quellen zur Frühmittelalterforschung im Nördlichen Harzvorland. Eine Übersicht zu den Grabungsergebnissen aus den Jahren 1976–1982. In: Naturschutz und Denkmalpflege im Braunschweiger Land, 75 Jahre Braunschweiger Landesverein für Heimatschutz, hrsg. v. Mechthild Wiswe, Braunschweig, S. 51 – 77.
- RÖTTING, HARTMUT (1985): „Nicht zu den Grabhügeln der Heiden...“ Christlich geprägte Friedhöfe im Braunschweiger Land. In: Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, Ausgrabungen 1979–1984, Stuttgart, S. 283 – 286.
- RÖTTING, HARTMUT (1997): Stadtarchäologie in Braunschweig, ein fachübergreifender Arbeitsbericht zu den Grabungen 1976–1992. Erweiterte Neuauflage mit einem Forschungsbericht 1997, hrsg. v. Christiane Segers-Glocke, Hameln.
- RÖTTING, HARTMUT (1999): Zu Bestattung und Repräsentation im friesischen und fränkischen Stil im Spiegel herausgehobener Grabanlagen von Schortens, Ldkr. Friesland. In: Über allen Fronten. Nordwestdeutschland zwischen Augustus und Karl dem Großen. Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 26, hrsg. v. Mamoun Fansa, Oldenburg, S. 231 – 248.
- RÖTTING, HARTMUT (2002): Die Entwicklung der frühen Stadt am Beispiel der Braunschweiger Altstadt. Archäologisch-historische und archäometrische Forschungsergebnisse. In: Zeitschrift für Archäologie des Mittelalters, Beiheft 14, S. 125 – 167.
- SCHOLZ, PETER & RÖTTING, HARTMUT (1995): Stadtarchäologie Braunschweig. Archäometrische Untersuchungen zur Definition und Abgrenzung keramischer Warengruppen. Ein Vorbericht. In: Nachrichten aus Niedersachsens Urgeschichte (NNU), Stuttgart, Bd. 64 (1), S. 17 – 31.



## **FEIERLICHE JAHRESVERSAMMLUNG 27. MAI 2005**

### **Halbleiter-Heterostrukturen in starken Magnetfeldern Erste Anfänge in Braunschweig und neuere Ergebnisse aus Würzburg\***

GOTTFRIED LANDWEHR

Physikalisches Institut der Universität Würzburg  
Am Hubland, D-97074 Würzburg

#### **Einleitung**

Die systematische Erforschung der Halbleiter setzte nach dem 2. Weltkrieg ein. In den 30er Jahren wurde zwar auch Halbleiterforschung betrieben, die jedoch keinen sehr guten Ruf genoss. Sie wurde manchmal als die Physik der Dreckeffekte bezeichnet. Mangelnde Reinheit führte zu widersprüchlichen Resultaten. Dies änderte sich jedoch nach dem Kriege, nachdem man gelernt hatte, die Halbleiter Germanium und Silizium in sehr reiner Form darzustellen. Es war gelungen, aus diesen Materialien leistungsfähige Detektoren für die Radartechnik herzustellen. Über die elektronische Struktur von Germanium und Silizium war 1945 nur wenig bekannt. Weil das Potential dieser Halbleiter für die Herstellung von Bauelementen für die Hochfrequenztechnik erkennbar war, setzte eine intensive Erforschung in Industrielaboratorien und auch an Universitäten ein. Wegen der Bedeutung dieser Stoffklasse wurde an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig ein Laboratorium eingerichtet, dass sich mit der Erforschung von Halbleitereigenschaften befasste.

Die University of Illinois war nach dem Kriege ein Zentrum der Halbleiterforschung. Dort war der Miterfinder des Transistors und Nobelpreisträger John Bardeen tätig. Das Hauptarbeitsgebiet des Halbleiterlaboratoriums in Urbana-Champaign war die Erforschung der Germaniumoberfläche. Im Jahre 1959 wurde ich von der PTB beurlaubt, um an der University of Illinois zu arbeiten. Die Oberflächenforschung erwies sich jedoch als schwierig und zeitaufwändig, weil

---

\* Vortrag gehalten beim Kolloquium anlässlich der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 27. Mai 2005.

die Ultrahochvakuumtechnik noch in den Kinderschuhen steckte. Aus diesem Grund habe ich damals die Erforschung einer inneren Oberfläche, der Korngrenze in einem Germanium Bikristall aufgenommen. Man wusste bereits, dass an der Germanium Oberfläche Verarmungsrandschichten auftreten können, die zu einer Inversionsschicht führen kann. In einem n-leitenden Germaniumkristall kann durch Oberflächenbelegung oder durch Anwendung eines elektrischen Feldes eine p-leitende dünne Randschicht erzeugt werden. 1956 hatte Robert Schrieffer, der später den Nobelpreis (zusammen mit John Bardeen und Leon Cooper) für die Theorie der Supraleitung erhielt, sich mit der elektronischen Struktur der Germaniumoberfläche befasst. Er war zu dem Schluss gekommen, dass bei hinreichend starker Inversion die p-leitende Schicht so dünn sein sollte, dass Quanteneffekte zu erwarten waren. Diese sollten auftreten, wenn die de Broglie Wellenlänge der freien Ladungsträger größer ist, als die Dicke des Potentialtopfes. Voraussetzung für die Ausbildung der Quanteneffekte ist eine hohe Beweglichkeit der Ladungsträger in der dünnen Oberflächenschicht. Schrieffer ging jedoch davon aus, dass die Streuung der Löcher an der Germaniumoberfläche so stark war, dass die gebundenen Quantenzustände sich nicht ausbilden konnten. Weil die Ladungsträger ein zwei dimensionales Elektronengas bilden, das sich parallel zur Oberfläche ziemlich ungehindert ausbreiten kann, spricht man von elektrischen Subbändern.

### Erste Experimente mit Germanium-Bikristallen

Bikristalle lassen sich gezielt durch Ziehen aus der Schmelze herstellen, wenn man zwei Keime gegeneinander verkippt. Das führt zu Fehlordnungen an der entstandenen Korngrenze und zur Bildung von unabgesättigten chemischen Bindungen, die Akzeptorcharakter haben. Bei Bikristallen mit einem Verkippfungswinkel  $> 10^\circ$  entsteht eine p-leitende Schicht, die man unabhängig vom n-leitenden Kristalläußeren untersuchen kann. In Figur 1 ist das Schema eines Bikristalls skizziert sowie eine Probe zum Studium galvanomagnetischer Eigenschaften, d.h. Messung des Widerstands in einem äußeren Magnetfeld. Dies ist möglich, wenn Indiumkontakte verwendet werden, die einen Ohm'schen Kontakt zur p-leitenden Inversionsschicht und einen gleichrichtenden zum Kristalläußeren vom n-Typ bilden. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass die Leitfähigkeit der Korngrenzzone bei Temperaturen von 2 bis 250 K sich wie die von stark dotiertem Germanium verhielt. Messungen der Änderung des elektrischen Widerstandes im Magnetfeld ergaben jedoch, dass der Widerstandsanstieg bei tiefen Temperaturen bis zu 2 Zehnerpotenzen höher war als auf Grund der Leitfähigkeitsdaten zu erwarten war. Die Magnetowiderstandsänderung hing nicht nur von der Temperatur sondern auch von der Stärke des Magnetfeldes ab. Die Messresultate waren Anfang der 60er Jahre noch nicht verständlich, sie mussten als anomal klassifiziert werden [1]. Erst etwa 20 Jahre

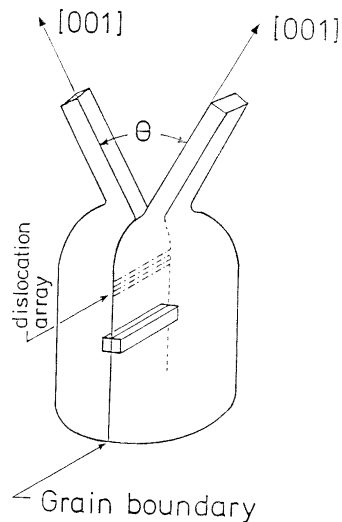


Abb. 1: Eine Korngrenze in einem Germanium Bikristall mit  $\theta > 10^\circ$  verhält sich wie ein 2 dimensionales elektronisches System von p-Typ, wenn die Leitfähigkeit im Volumen unterdrückt wird.

später wurde die Theorie für den Transport in 2-dimensionalen fehlgeordneten Systemen entwickelt [2]. Auf Grund von Quanteneffekten tritt eine anomale Magnetowiderstandsänderung auf, die auf Interferenzerscheinungen zurückzuführen ist. Auch die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit bei sehr tiefen Temperaturen unterhalb von 1 K kann derzeit theoretisch gedeutet werden. Zur Messung dieser Effekte ist allerdings die Beherrschung von Temperaturen im Millikelvinbereich erforderlich, die in den 60er Jahren noch nicht weit verbreitet war.

Die elektronische Bandstruktur an der Korngrenze eines Germanium Bikristalls wurde in den 80er Jahren in Würzburg theoretisch berechnet [3], die Resultate sind in Figur 2 wiedergegeben. Das Potential ist symmetrisch, es sind 2 elektrische Subbänder erkennbar, die den schweren und leichten Löchern zuzuordnen sind. Erste Versuche in Illinois zum Nachweis der elektrischen Subbänder waren nicht erfolgreich, es stand lediglich ein Elektromagnet mit einer maximalen Feldstärke von 12000 Gauss (oder 1,2 T) zur Verfügung. Erst sehr viel stärkere Magnetfelder führten etwa 20 Jahre später zum Nachweis der elektrischen Quantisierung [4]. Die in Abbildung 3 gezeigten Kurven eines durch Quanteneffekte bedingten oszillatorischen Widerstandes eines Germanium Bikristalls im Magnetfeld wurden am Hochfeldmagnetlaboratorium Grenoble in Magnetfeldern bis zu 25 T erzielt.

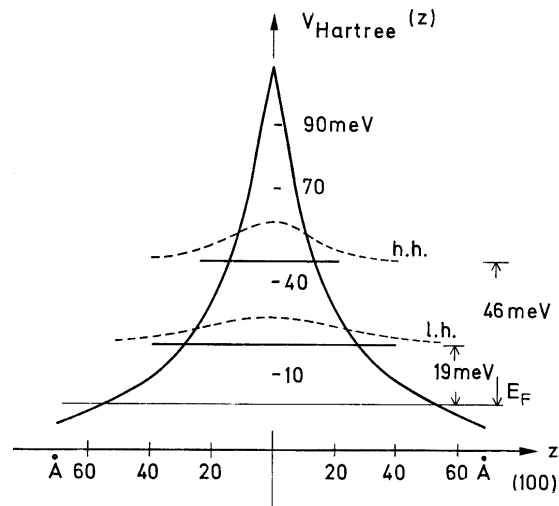


Abb. 2: Berechnung von el. Subbändern für einen Ge-Bikristall durch selbstkonsistente Lösung von Schrödinger- und Poisson-Gleichung mittels der  $k \cdot p$  Methode (E. Bangert, Würzburg, ref. [3]).  
 hh=Subband von schweren Löchern; lh=Subband von leichten Löchern;  $E_F$ =Fermi Energie.

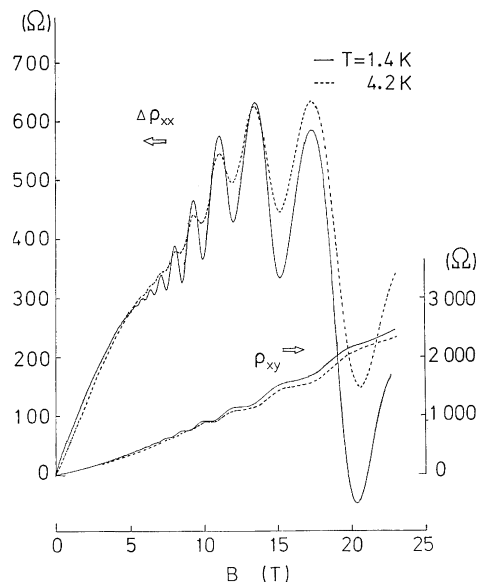


Abb. 3: Magnetowiderstand und Hall-Widerstand für einen Ge-Bikristall mit  $\theta=15^\circ$  (ref. [4]).



### **Erste Messungen des Magnetowiderstandes in starken Magnetfeldern in Braunschweig**

Seit 1946 hatte Eduard Justi den Lehrstuhl für Technische Physik an der TH Braunschweig inne. In den 30er Jahren war er Leiter des Kältelaboratoriums der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) in Berlin. Das Kältelaboratorium verfügte über flüssiges Helium und einen starken Elektromagneten. An der PTR hatte Justi mit seinen Mitarbeitern den Magnetowiderstand von reinen Metalleinkristallen bei tiefen Temperaturen studiert und insbesondere die Anisotropie. Diese Richtungsabhängigkeit war sehr ausgeprägt und zur damaligen Zeit nicht verständlich. Die Bändertheorie der festen Körper existierte bereits, es konnten jedoch nur qualitative Schlussfolgerungen gezogen werden, weil detaillierte Berechnungen der Bandstruktur unter Berücksichtigung des Kristallgitters noch nicht vorlagen. Die in Berlin erzielten Resultate konnten erst nach dem zweiten Weltkrieg interpretiert werden.

An der Berliner Universität war in den 30er Jahren der Theoretiker Max Kohler als Dozent tätig. Er hatte bei Max von Laue über Relativitätstheorie promoviert. Darüber hinaus interessierte er sich für Festkörperphysik und insbesondere für Transporteffekte, die durch starke Magnetfelder hervorgerufen werden. Es kam zu einer Zusammenarbeit zwischen Justi und Kohler, die auch im Krieg fortgeführt wurde. Die von Justi und Mitarbeitern noch an der Reichsanstalt erzielten Resultate führten zur Formulierung der sogenannten Kohler'schen Regel die besagt, dass die Änderung des elektrischen Widerstandes im Magnetfeld vom Verhältnis von Magnetfeld zu Widerstand im Feld Null abhängt. Eduard Justi hat auch nach seiner Berufung nach Braunschweig im Jahre 1946 sein Interesse an Transportmessungen in starken Magnetfeldern beibehalten.

Am Institut für Technische Physik wurden neben Leitfähigkeitsmessungen mit und ohne Magnetfeld auch die Thermoelektrizität und die Photovoltaik erforscht. Eine Arbeitsgruppe befasste sich mit Brennstoffzellen. Eduard Justi hatte die Bedeutung der Energiedirektumwandlung frühzeitig erkannt, er war offenbar seiner Zeit ziemlich weit voraus.

Im Justi'schen Institut wurde in den 60er Jahren eine von Max Kohler angeregte Arbeit zur Magnetowiderstandsänderung von Kalium bei tiefen Temperaturen durchgeführt. Dazu wurde eine Apparatur zur Erzeugung von gepulsten Magnetfeldern bis 10 T gebaut [5]. Mit dieser Apparatur wurden die ersten oszillatorischen Effekte in der Magnetowiderstandsänderung des Halbleiters Wismut-Tellurid gemessen [6]. Eine spätere Messung ist in Figur 4 wiedergegeben.

### **Messung der oszillatorischen Magnetowiderstandsänderung von Halbleitern (Shubnikov deHaas Effekt)**

Bringt man einen Halbleiter mit hoher Ladungsträgerbeweglichkeit in ein starkes Magnetfeld, erfolgt eine Quantisierung der Ladungsträgerenergie auf Grund

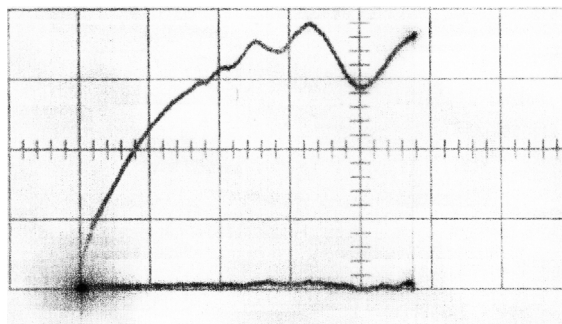


Abb. 4: Shubnikov – de Haas Oszillationen eines  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - Einkristalls gemessen mit einem gepulsten Magnetfeld bis 100 kG bei 4.2K (Nach P. Drath, ref. [6]).

einer periodischen Bewegung der Elektronen (oder Löcher) um die Richtung des Magnetfeldes. Dies wurde Anfang der 30er Jahre von L. Landau theoretisch berechnet. Dazu müssen die Magnetfelder so stark sein, dass ein Ladungsträger mindestens einen Umlauf um die Richtung des Magnetfeldes ausgeführt hat, ehe er gestreut wird. Die Erfüllung dieser Bedingung setzt auch tiefe Temperaturen voraus. Voraussetzung ist weiterhin, dass der Halbleiter sich quasi metallisch verhält, d.h. die Fermienergie muss im Band liegen. Der elektrische Widerstand zeigt als Funktion eines Magnetfeldes typische Oszillationen, deren Amplitude mit dem Magnetfeld zunimmt, die zuerst von L. Shubnikov an Wismut beobachtet wurden. Eine Analyse der Richtungsabhängigkeit der Shubnikov deHaas Oszillationen erlaubt eine Bestimmung der elektronischen Bandstruktur. Nach dem erfolgreichen Experiment [5] am Institut für Technische Physik wurde auch an der PTB eine Pulsapparatur gebaut, welche die Erzeugung von Feldern bis zu 25 T bei einer Pulslänge von einigen Millisekunden erlaubte. Mit dieser Apparatur wurde auch der Magnetowiderstand von Korngrenzen in Germanium Bikristallen bei hohen Magnetfeldern gemessen, allerdings ohne den Nachweis von Quantenoszillationen. Der spätere Erfolg von Messungen in Grenoble ist auf die höhere Qualität der verwendeten Germanium Bikristalle zurückzuführen. Weiterhin wurde der Shubnikov deHaas Effekt von Tellur studiert [7] sowie die Magnetowiderstandsänderung an Indium Antimonid in der Quantengrenze, wenn nur das unterste Landau Niveau besetzt ist [8].

### Beginn der Erforschung 2-dimensionaler Systeme in Würzburg

Die Dissertation von Klaus von Klitzing, der 1969 als Doktorand nach Würzburg kam, betraf die Magnetowiderstandsänderung von Tellur-Einkristallen in der Quantengrenze. Im Laufe dieser Untersuchungen zeigten sich unerwartete

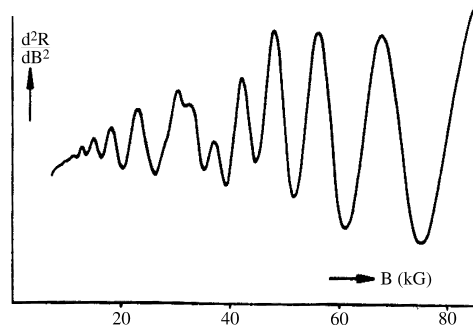


Abb. 5: Zweite Ableitung des el. Widerstandes eines Te-Kristalls geringer Dotierung mit einer Anreicherungsschicht auf der Oberfläche. (Nach K. v. Klitzing, ref. [9]).

Shubnikov deHaas Oszillationen. Sie wurden hervorgerufen durch eine Anreicherungsrandschicht an der Telluroberfläche. Die Effekte waren sehr klein und die in Abbildung 5 gezeigten Oszillationen waren nur in der 2. Ableitung des elektrischen Widerstandes nach dem Magnetfeld sichtbar [9]. Die Publikation dieser Resultate führte zu einer Zusammenarbeit mit Gerhard Dorda von den Siemens Forschungslaboratorien in München. Er hatte den Piezowiderstandseffekt von Silizium MOSFETs erforscht und gefunden, dass er wesentlich von den Resultaten in 3-dimensionalem Silizium abwich. Er war nach Würzburg gekommen um eine Kooperation bei der Untersuchung des Piezo-widerstandseffektes bei tiefen Temperaturen in starken Magnetfeldern zu eruieren.

### Untersuchung an Silizium MOSFETs

Der MOSFET (Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor) ist ein Bauelement, das Grundlage der modernen integrierten Schaltkreise ist. Transporteigenschaften im Magnetfeld von Silizium MOSFETs wurden zum ersten Mal Anfang der 60er Jahre bei den IBM Laboratorien in den USA erforscht [10]. Beim MOSFET wird durch einen Oberflächenkondensator zwischen „source and drain“ ein leitfähiger Kanal erzeugt, dessen Leitfähigkeit man durch die angelegte Gatespannung kontrollieren kann. Man kann sowohl n- als auch p-leitende Kanäle erzeugen. Die Ladungsträgerbeweglichkeit in n-Kanälen ist in der Regel so hoch, dass man bereits in Magnetfeldern von 10 T ausgeprägte Landauquantisierung erzielen kann und damit Shubnikov deHaas Oszillationen messen kann. Vor dem Besuch von Gerhard Dorda in Würzburg waren nur Quantenoszillationen an n-leitenden Kanälen nachgewiesen. Bei Diskussionen zeigte sich jedoch, dass in München p-Kanal MOSFETs verfügbar waren, bei denen die Löcherbeweglichkeit so hoch war, dass Quantenoszillationen nachweisbar sein sollten. Klaus

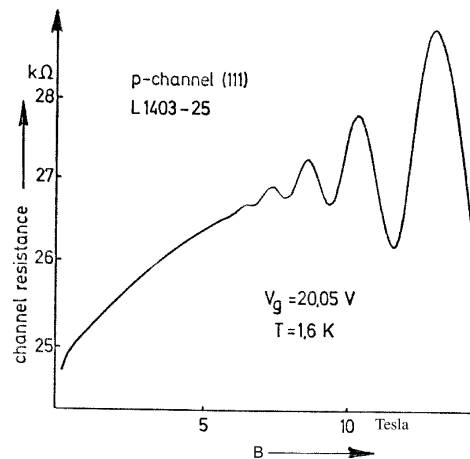


Abb. 6: Messungen an p-Kanal MOSFETs an der Hochfeld-Magnetanlage Braunschweig (K. v. Klitzing, 1974, ref. [12]).

von Klitzing gelang zum ersten Mal der Nachweis von solchen Oszillationen, zunächst in der Ableitung der Magnetowiderstandskurve, später auch im Widerstand [11]. Die am Würzburger Physikalischen Institut verfügbaren Magnetfelder, die mit Hilfe eines supraleitenden Magneten erzeugt wurden, waren auf 10 T beschränkt. Messungen in höheren Magnetfeldern waren jedoch zweckmäßig. Aus diesem Grund wurden 1974 Messungen an der Hochfeldmagnetanlage der TH Braunschweig durch Klaus von Klitzing ausgeführt. Ein Beispiel einer Registrierkurve ist in Abbildung 6 wiedergegeben [12]. Für die Interpretation der Messresultate war die Berechnung der elektrischen Subbänder von p-Kanal MOS-Strukturen erforderlich. Diese wurden in Würzburg von E. Bangert [13] ausgeführt und unabhängig davon von Ando und Uemura in Japan [14]. Es zeigte sich, dass die Bandstruktur von p-Kanal MOSFETs sich wesentlich von der Volumenbandstruktur unterschied.

### Erzeugung starker Magnetfelder

Starke Magnetfelder sind seit langem ein wertvolles Hilfsmittel der Festkörperphysik. Stationäre Magnetfelder bis zur Stärke von 3000 Gauss (0,3 T) konnte man seit langem mit kleinen Elektromagneten erzeugen. Felder von 1 T wurden in der Vergangenheit (z.B. im Kältelaboratorium der PTR in Berlin) mit schweren Elektromagneten mit einer Leistung von ca. 100 kW hergestellt. Höhere stationäre Felder von etwa 10 T wurden zum ersten Mal am MIT in Boston in den 30er Jahren von Francis Bitter mit wassergekühlten Kuperspulen mit ei-

nem Energieaufwand von 2 Megawatt erzeugt. Weil Bedarf an höheren Feldstärken vorhanden war, wurden Mitte der 60er Jahre an verschiedenen Stellen der Welt Hochmagnetfeldlaboratorien etabliert, in denen mit einem Energieaufwand von 10 Megawatt Felder von maximal 20 T hergestellt werden konnten. Im Zuge dieser Entwicklungen wurde an der TH Braunschweig auf Grund der Initiative von Eduard Justi ein Hochfeldmagnetlaboratorium mit einer Energieversorgung von 5 Megawatt eingerichtet. Es wurde möglich, in Magneten mit einer Bohrung von 5 cm 15 T zu generieren und bei 3 cm Innendurchmesser 18 T. Diese Anlage wurde im Wesentlichen von der Volkswagen Stiftung finanziert. Die neuen Möglichkeiten wurden durch viele Gäste genutzt, auch von Klaus von Klitzing, dessen Experimente an p-Kanal MOSFETs bereits erwähnt wurden [12].

Bei der Erzeugung starker Magnetfelder hatte es in den 60er Jahren große Fortschritte gegeben, nachdem man gelernt hatte, supraleitende Materialien mit hoher Stromtragfähigkeit und kritischer Feldstärke herzustellen. Die supraleitenden Magneten wurden sehr rasch akzeptiert, weil sie relativ preisgünstig waren und weil Messungen in Feldern bis zu 10 T vor Ort möglich wurden. In der Zwischenzeit ist es möglich, supraleitende Magneten mit einer maximalen Feldstärke von 20 T herzustellen. Die Erforschung von optischen und Transporteigenschaften von Halbleitern nahm einen großen Aufschwung. Allerdings sind konventionell erzeugte Magnetfelder nach wie vor unentbehrlich, weil es möglich wurde, höhere Feldstärken bis zu 33 T mit einem Energieaufwand von 20 Megawatt zu erreichen. Die Kombination eines äußeren Supraleitungsmagneten und eines inneren wassergekühlten Magneten gestattet es, in den sogenannten Hybridmagneten Felder bis zu 45 T zu erzeugen. Vor kurzem hat eine von der American National Science Foundation eingesetzte Kommission eine Denkschrift vorgelegt, in der die Forschungsmöglichkeiten mit starken Magnetfeldern aufgezeigt werden. Eine Weiterentwicklung der Magnettechnologie wird nachdrücklich vorgeschlagen [15].

Am Physikalischen Institut der Universität Würzburg wurde 1976 ein Supraleitungsmagnet mit einer maximalen Feldstärke von 14,6 T angeschafft, der zu weiteren Experimenten an Silizium MOSFETs genutzt wurde, von denen im folgenden die Rede sein wird. In Figur 7 zeigt Klaus von Klitzing an diesem Magneten.

### Experimente an n-Kanal MOSFETs

Mitte der 70er Jahre wurden die Untersuchungen an Feldeffekttransistoren auf Proben mit einem n-leitenden Kanal ausgedehnt. Die n-leitenden MOSFETs haben eine wesentlich höhere Trägerbeweglichkeit als diejenigen mit einer p-leitenden Oberflächenrandschicht. An Exemplaren mit getrennten Potential-



Abb. 7: K. v. Klitzing am Würzburger 14,6 Tesla Supraleitungsmagnet.

und Stromsonden die von den Siemens Laboratorien zur Verfügung gestellt wurden, wurden der Magnetowiderstand und der Hall-Effekt studiert. Weil es möglich ist, in einer Feldeffektanordnung die Elektronenkonzentration in einem weiten Bereich durch die Gate-Spannung zu variieren, ist es möglich, Quantenoszillationen in einem konstanten Magnetfeld als Funktion der Konzentration der Ladungsträger im Kanal zu studieren. Die ersten spektakulären Ergebnisse wurden 1977 erzielt und 1978 publiziert [16]. Im oberen Teil von Abbildung 8 sieht man strukturierte Maxima im elektrischen Widerstand als Funktion der Gatespannung. Zwischen den Maxima geht der Widerstand auf Null herunter. Die Maxima sind einzelnen Landauniveaus zuzuordnen und auf Grund des Elektronenspins aufgespalten. Eine weitere Aufspaltung zeigt sich auf Grund der speziellen Bandstruktur des Siliziums, die so genannte „Valley Aufspaltung“. Im Unterteil der Abbildung ist der Hall Widerstand aufgetragen. Dieser nimmt mit zunehmender Gatespannung auf Grund der zunehmenden Ladungsträgerkonzentration ab. Bei einer Gatespannung von 8 V tritt ein Plateau auf, das zunächst nicht gedeutet werden konnte. Im Jahr 1980 konnte Klaus von Klitzing bei Messungen im Hochmagnetfeldlaboratorium Grenoble nachweisen, dass die auftretenden Plateaus ganzzahligen Bruchteilen von  $h/e^2$  zu-

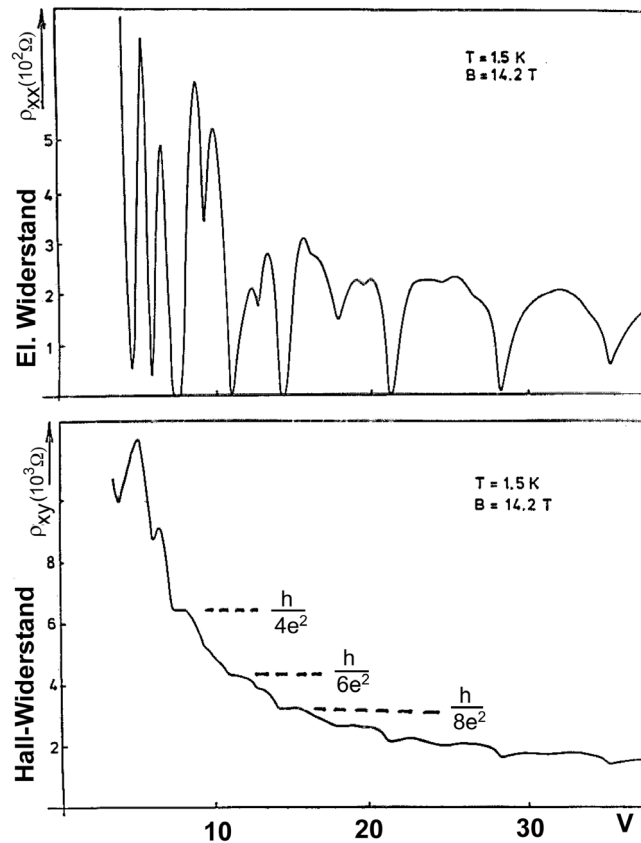


Abb. 8: Daten zum Längswiderstand  $\rho_{xx}$  und Hallwiderstand  $\rho_{xy}$  von n-Kanal MOSFETs präsentiert 1978 bei der Intern. Conf. EP2DS in Berchtesgaden. Die Beschriftungen der Quanten-Hall Niveaus fehlten in der ursprünglichen Veröffentlichung (ref. [16]).

geordnet sind [17]. Anschließende Messungen am Würzburger 14,6 T Magneten ergaben eine außerordentliche Präzision der Quantisierung des 4. Plateaus, Abweichungen von  $h/4e^2$  waren kleiner als  $5 \times 10^{-6}$ . Dies ist der integrale Quanten Hall-Effekt, eine Entdeckung von fundamentaler Bedeutung, die 1985 mit der Verleihung des Nobelpreises an Klaus von Klitzing gewürdigt wurde. Die weitere Entwicklung ist bekannt und soll hier nicht weiter diskutiert werden. An GaAs/GaAlAs Quantentrogstrukturen mit extrem hoher Elektronenbeweglichkeit wurde der fraktionale Quanten Hall-Effekt entdeckt [18], der auf Vielteilcheneffekte zurückgeführt wird. 25 Jahre nach der Entdeckung werden mehr als 400 Arbeiten pro Jahr zum Quanten Hall-Effekt publiziert.

### Halbleiter-Heterostrukturen

Silizium MOSFETs sind Heterostrukturen, im gegenwärtigen Sprachgebrauch bezeichnet man jedoch meistens solche Schichtenstrukturen als Heterostrukturen, bei denen Halbleiterschichten aus Materialien mit unterschiedlicher Bandlücke aufeinander folgen. Die Erzeugung von Schichtenstrukturen wurde in den 70er Jahren durch die Molekularstrahlepitaxie (MBE) möglich. Mit dieser Technik ist es möglich, dünne Schichten sukzessiv Atomlage für Atomlage kontrolliert zu erzeugen. Dies geschieht durch langsames Aufwachsen im Ultrahochvakuum. Auch andere Epitaxie Methoden wurden in die Halbleiterphysik eingeführt, die es ermöglichten, neue Bauelemente wie Heterobipolartransistoren zu realisieren. Das Heterostrukturprinzip erlaubte es auch, funktionsfähige Halbleiterlaser zu konzipieren und zu realisieren. Diese Entwicklung erwies sich als sehr bedeutsam. Für ihre Arbeiten über Halbleiterheterostrukturlaser wurde Herbert Kroemer und Zhores Alferov 2000 der Nobelpreis für Physik verliehen.

Mit Hilfe der Molekularstrahlepitaxie wurde es möglich, neuartige Strukturen mit maßgeschneiderter Bandstruktur herzustellen. Als besonders geeignet erwiesen sich die III-V Halbleiter GaAs und AlAs, die sich nur unwesentlich in der Gitterkonstante unterscheiden. Dadurch wird es möglich, defektarme Grenzflächen zu realisieren. Nach einem Vorschlag von Leo Esaki wurden Supergitter mit GaAs Potentialtrögen und GaAlAs Potentialbarrieren hergestellt. Als besonders interessant erwies sich auch das Studium von Einzelquantentrögen die es erlaubten, die durch Grenzflächenquantisierung entstandenen elektrischen Subbänder mit optischen Methoden zu studieren. Auch die Erforschung der Magnetotransporteigenschaften von 2-dimensionalen Strukturen auf der Basis von GaAs erwies sich als sehr erfolgreich. Bald nach der Entdeckung des Quanten Hall-Effektes an Si-MOSFETs gelang es den Effekt auch an GaAs Heterostrukturen nachzuweisen [19]. Die Entdeckung des fraktionalen Quanten Hall-Effektes im Jahr 1982 durch T.C. Tsui, H. Störmer und R. Laughlin wurde bereits erwähnt, sie wurde 1998 durch Verleihung des Nobelpreises für Physik gewürdigt.

### Heterostrukturen aus II-VI-Halbleitern

Auch aus Verbindungshalbleitern, die aus Elementen der II. und VI. Hauptgruppe des Periodensystems zusammengesetzt sind, lassen sich mit Hilfe der MBE Heterostrukturen hoher Güte erzeugen. Im Folgenden soll kurz vom System HgTe/CdTe berichtet werden, das am Physikalischen Institut Würzburg in der letzten Dekade intensiv erforscht wurde. Da auch HgTe und CdTe sich nur wenig in der Gitterkonstante unterscheiden, ist es möglich, Quantentrogstrukturen hoher Qualität herzustellen. Das System ist deshalb von speziellem Interesse, weil HgTe ein Halbmetall ist, bei dem sich Leitungs- und Valenzband



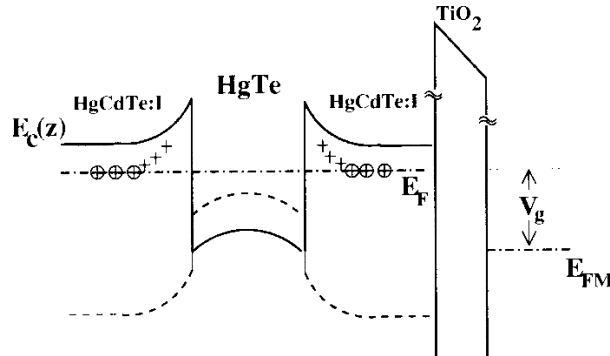


Abb. 9: Schema eines mit Iod modulationsdotierten HgTe/HgCdTe Quantentrogs mit einem seitlichen Gate mit  $\text{TiO}_2$  Isolator.  $E_F$  = Fermi Energie.  $V_g$  = Gate Spannung.  $E_c$  = Energie des Leitungsbandes.

überlappen. Der Einschluss einer dünnen HgTe Schicht zwischen 2 Barrieren aus HgCdTe erlaubt es jedoch auf Grund der Ausbildung von elektrischen Subbändern die Überlappung von Valenz- und Leitungsband aufzuheben. Es entsteht ein Halbleiter mit kleiner Bandlücke der Größenordnung 10 meV. Weil das Halbmetall HgTe eine so genannte invertierte Bandstruktur aufweist, bei der das niedrigste Leitungsband und das den leichten Löchern zugeordnete Valenzband ihre Rollen vertauscht haben, weisen HgTe Quantentrogstrukturen besondere Eigenschaften auf [20]. Eine HgTe/HgCdTe Struktur mit einem einzelnen Quantentrog ist in Figur 9 schematisch dargestellt. Es lassen sich durch Modulationsdotierung Proben mit sehr hoher Elektronen- und Löcherbeweglichkeit herstellen. Bei Modulationsdotierung wird das Barrierenmaterial nahe an den Grenzflächen des Quantentrogs dotiert. Die Trennung der freien Ladungsträger im Trog von den ionisierten Dotieratomen in den Barrieren erlaubt eine hohe Elektronenbeweglichkeit von mehr als  $10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Dadurch ist ein Studium des Shubnikov deHaas Effektes möglich. Das besondere an HgTe/HgCdTe Quantentrogstrukturen ist, dass bei asymmetrischer Modulationsdotierung auf Grund von Spin-Bahn-Wechselwirkung eine Spinaufspaltung der Energieniveaus auftritt. Durch ein externes elektrisches Feld, das durch eine seitliche Gate-Elektrode erzeugt wird, lässt sich die Spinaufspaltung steuern (Rashba Effekt). Dies ist von Interesse für das neue Arbeitsgebiet der Spintronik, das zum Ziel hat, Bauelemente zu realisieren, die nicht auf der Elektronenladung sondern auf dem Elektronenspin beruhen.

In Figur 10 sind Daten zum Shubnikov deHaas Effekt eines symmetrischen HgTe/HgCdTe Quantentrogs wiedergegeben, bei dem mit Hilfe einer Gateelektrode die Spinaufspaltung verändert wird [21]. Im linken Teil der Abbildung sind 5 Messkurven dargestellt, die bei unterschiedlichen Gatespannungen gewon-

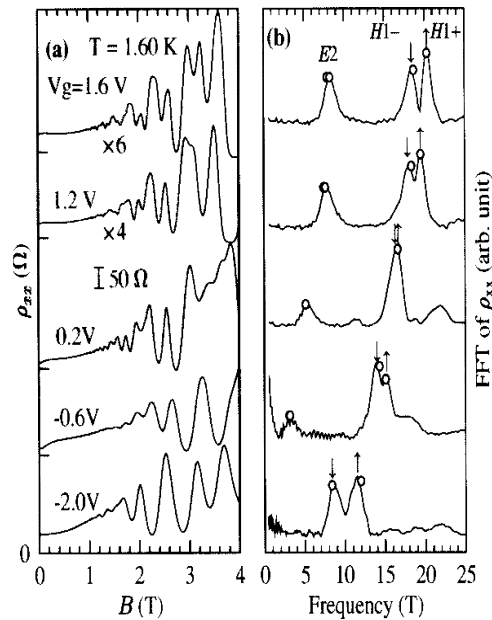


Abb. 10: Shubnikov deHaas Oszillationen eines symmetrischen HgTe/HgCdTe Quantentrogs mit einer Dicke von 21 nm für 5 verschiedene Gate Spannungen (links). Fourier Analyse der SdH Oszillationen bei den entsprechenden Gate-Spannungen (rechts). Die Spin-Aufspaltung des  $H_1$  Bandes bei größeren positiven und negativen  $V_g$ -Werten ist deutlich zu erkennen.  $E_2$  = oberes Leitungsband,  $H_1$  = unterstes Leitungsband (ref. [21]).

nen wurden. Durch Fourieranalyse lassen sich 2 Leitungsbander,  $E_2$  und  $H_1$  identifizieren. Im rechten Teil von Abbildung 10 kann man bei positiven und negativen Gatespannungen eine Spinaufspaltung des untersten Leitungsbandes  $H_1$  erkennen, die durch ein elektrisches Feld verursacht wird. Hinsichtlich Einzelheiten muss auf die Originalarbeit [21] verwiesen werden.

Die hohe Qualität der HgTe/HgCdTe Quantentrogstruktur ist an sehr gut ausgebildeten Quanten-Hall Plateaus zu erkennen. Der Hall-Widerstand für diverse Gatespannungen zwischen -2,4 und 1,6 V ist in Abbildung 11 wiedergegeben.

Schließlich soll noch eine Messung des Quanten-Hall Effektes wiedergegeben werden, bei dem das unterste Landau Niveau mit der Quantenzahl 1 bei magnetischen Feldstärken und  $T = 1,2$  K zwischen 2 und 27 T besetzt ist und der Hall-Widerstand  $h/e^2$  beträgt. Es handelt sich um eine niedrig dotierte HgTe Probe mit ca. 2 % Mn im Quantentrog. Auf Grund der (legierungsbedingten) Fehlordnung im Trog geht auch bei sehr hohen Magnetfeldern der Widerstand nicht in die Quantengrenze [22]. Eine genaue Analyse der Daten ist in Vorbereitung.

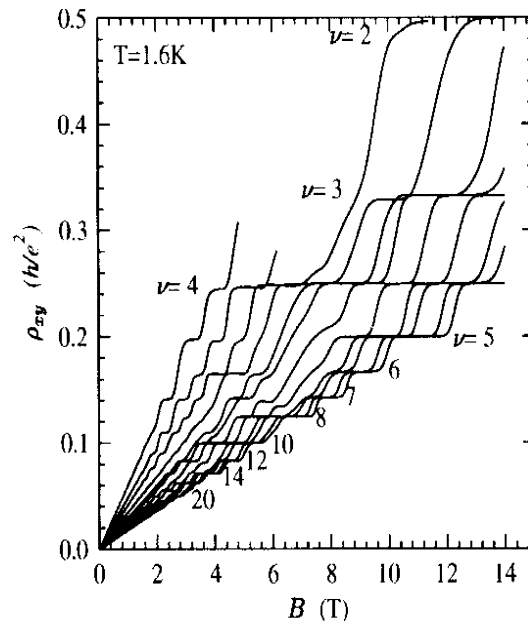


Abb 11: Quantum Hall Effekt derselben Probe bei diversen Gate-Spannungen  
 $\nu$  = Besetzungszahlen der jeweiligen Landau-Niveaus (ref. [21]).

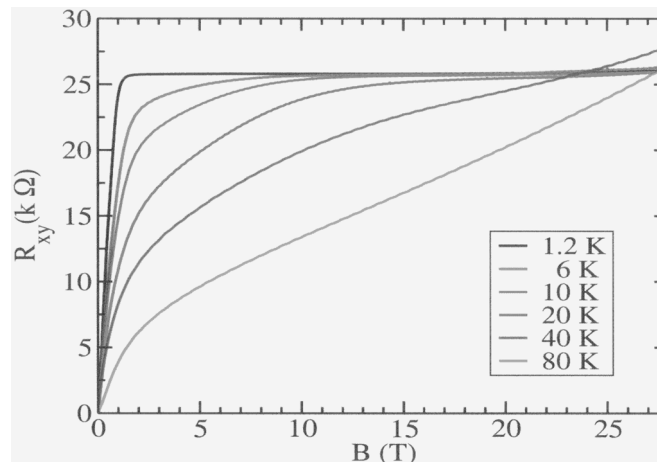


Abb. 12: Hall-Widerstand eines HgMnTe Quantentrogs bei Temperaturen zwischen 1,2 und 80 K und Magnetfeldern bis 27 T. Der QHE mit der Besetzungszahl  $\nu = 1$  des untersten Landau Niveaus ist bei 1,2 K bereits ab 2 T ausgebildet (nach ref. [22]).

### Schlussbemerkungen

Anlässlich des Gauss Jahres werden einige frühere Entwicklungen der Braunschweiger Physik aufgezeigt, die sich als wichtig erwiesen haben. Die Geschichte der Physik befasst sich vorwiegend mit länger zurückliegenden Zeitabschnitten. In der wissenschaftlichen Spezialliteratur sind historische Zusammenhänge häufig nur schwer zu erkennen. Beschränkungen des zur Verfügung stehenden Platzes bei Publikationen haben zur Folge, dass die Vorgeschichte häufig in Zitaten verborgen ist, die sich oft nur dem speziell Interessierten erschließen. Aus diesem Grund sind die Braunschweiger Entwicklungen, die auf der Anwendung starker Magnetfelder beruhen, etwas ausführlicher dargestellt.

Eines wird hoffentlich deutlich: Große wissenschaftliche Fortschritte erfordern eine lange Vorlaufzeit. Sie sind meistens aus Grundlagenforschung erwachsen, für die anfänglich keine Anwendungen zu erwarten waren. Ein gutes Beispiel dafür ist der Quanten Hall-Effekt. Die ersten Anfänge entstanden an der PTB und hatten mit deren erklärter Hauptaufgabe, der Entwicklung von Präzisionsmessmethoden und der Realisierung der physikalischen Grundeinheiten, zunächst wenig zu tun. Für die Unterstützung der Halbleiterforschung in starken Magnetfeldern durch das Direktorium der PTB war offenbar die Neuigkeit der Arbeiten und deren Niveau entscheidend. Niemand konnte erwarten, dass aus dem Shubnikov-de Haas Effekt einmal die von Klitzing Konstante und ein Widerstandsnormale bisher unerreichter Präzision entstehen würde (für Einzelheiten siehe ref. [23]). Es kann keinem Zweifel unterliegen, dass Karl Friedrich Gauss, der einen großen Teil seiner physikalischen Aktivitäten dem Magnetismus gewidmet hat, am Quanten Hall-Effekt seine Freude gehabt hätte.

Noch etwas dürfte klar geworden sein: Die geschilderten Arbeiten zum Magneto-Transport erforderten die Kombination von extremen Bedingungen, nämlich von tiefen Temperaturen im Bereich des flüssigen Heliums und Magnetfeldern, die mindestens Hunderttausend Mal stärker waren, als die seinerzeit von Gauss erforschten. Unabdingbar war auch die Verfügbarkeit von Halbleiterproben hoher Qualität, seien es Einkristalle oder Silizium Strukturen. Die Materialien stammten übrigens häufig aus Industrielaboratorien, die derzeit von Politikern angeordnete Kooperation zwischen Universitäten und Industrie wurde bereits vor 50 Jahren erfolgreich praktiziert. Es dürfte auch wohl klar geworden sein, dass Max Kohler und Eduard Justi für den Beginn der hier skizzierten Entwicklung eine fundamentale Rolle gespielt haben.

Der Beginn der Erforschung 2-dimensionaler elektronischer Systeme in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts hatte Fortschritte bei der Herstellung dünner Schichten zur Voraussetzung, die ein Studium von Quanteneffekten erlauben. Es ist evident, dass Anwendungsaspekte bei der Entwicklung der Silizium-Technologie der Hauptimpetus waren. Aber auch die GaAs Technologie wurde vom Bedürfnis nach leistungsfähigeren Bauelementen vorangetrieben. Es ist

offensichtlich, dass die Grundlagenforschung von der Leistungsfähigkeit der Molekularstrahl-Epitaxie außerordentlich profitiert hat. Die Erforschung niederdimensionaler Strukturen wurde in der Halbleiterphysik immer wichtiger, der Schwerpunkt lag zunächst auf GaAs basierten Heterostrukturen. Die hinzukommenden II-VI-Schichtenstrukturen erwiesen sich wegen ihrer speziellen Eigenschaften und insbesondere wegen ihrer kleinen Bandlücke als besonders interessant. Davon soll der letzte Abschnitt über neuere Würzburger Arbeiten einen Eindruck vermitteln.

Naturgemäß konnte hier nur ein relativ pauschaler Eindruck von dem angesprochenen Arbeitsgebiet vermittelt werden, hinsichtlich Einzelheiten wird auf die Originalliteratur verwiesen.

### Danksagung

Frau Anja Brück - Poirier danke ich für die Hilfe bei der Herstellung des Manuskripts.

### Literaturverzeichnis

- [1] G. LANDWEHR, G. & P. HANDLER: J. Phys. Chem. Solids **23**, 891 (1962)
- [2] ALTSHULER, B.L., A.G. ARONOV & P.A. LEE: Phys. Rev. **44**, 1288 (1980)
- [3] UCHIDA, S., G. LANDWEHR & E. BANGERT: Solid State Comm. **45**, 869 (1983)
- [4] LANDWEHR, G., E. BANGERT & S. UCHIDA: Solid State Electronics **28**, 171 (1985)
- [5] LANDWEHR, G. & K. AUCH: Z. f. Naturforschung **18a**, 424 (1963)
- [6] LANDWEHR, G. & P. DRATH: Z. Angew. Physik **20**, 392 (1966)
- [7] BRAUN, E. & G. LANDWEHR: Z. f. Naturforschung **21a**, 495 (1966)
- [8] BLIEK, L.M., G. LANDWEHR & M. VON ORTENBERG: Proc. Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, Moscow, 1968, p. 710
- [9] KLITZING, K. VON & G. LANDWEHR: phys. stat. sol. (b) **45**, K112 (1971)
- [10] FOWLER, A.B., F.F. FANG, W.E. HOWARD & P.J. STILES: J. Phys. Soc. Japan **21**, Suppl. (1966) p. 331
- [11] KLITZING, K. VON, G. LANDWEHR & G. DORDA: Solid State Comm. **15**, 489 (1974)
- [12] KLITZING, K. VON, G. LANDWEHR & G. DORDA: Japan. Journ. Appl. Phys. Suppl. 2, Pt 2, 351 (1974)
- [13] BANGERT, E., K. VON KLITZING & G. DORDA: Proc. 12th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, Stuttgart 1974, p. 714, Teubner, Stuttgart 1974

- [14] OHKAWA, F.J. & Y. UEMURA, Progress in Theoretical Physics, Suppl. **57**, 164 (1974)
- [15] Opportunities in High Magnetic Field Science, The National Academies Press, Washington 2005
- [16] ENGLERT, TH. & K. VON KLITZING: Surface Science **13**, 70 (1978)
- [17] KLITZING, K. VON, G. DORDA & M. PEPPER: Phys. Rev. Lett. **45**, 494 (1980)
- [18] TSUI, D.C., H.L. STÖRMER & A.C. GOSSARD: Phys. Rev. Lett. **48**, 1562 (1982)
- [19] TSUI, D.C. & A.C. GOSSARD: Appl. Phys. Lett. **37**, 550 (1981)
- [20] LANDWEHR, G.: Physica **B 298**, 384 (2001)
- [21] ZHANG, X.C., A. PFEUFFER-JESCHKE, K. ORTNER, V. HOCK, H. BUHMANN, C.R. BECKER & G. LANDWEHR: Phys. Rev. B **63**, 2453 (2001)
- [22] BUHMANN, H., J. LIU, Y.S. GUI, V. DAUMER, M. KÖNIG, C.R. BECKER & L.W. MOLENKAMP: Proc. 15th Int. Conf. Appl. High Magnetic Fields, Oxford 2002 (CD, see 5.2)
- [23] LANDWEHR, G.: Physica E **1** (2003)

## **Spineffekte beim Tunneln durch Halbleiterquantenpunkte\***

ROLF J. HAUG

Abteilung Nanostrukturen, Institut für Festkörperphysik, Universität Hannover  
Appelstraße 2, D-30167 Hannover

In den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts wurde bei Experimenten der Atomphysik eine zusätzliche Eigenschaft des Elektrons, der sogenannte Spin, der einen Eigendrehimpuls darstellt, gefunden [1]. Dieser Elektronenspin konnte erst später in der relativistischen Formulierung der Quantenmechanik durch Dirac theoretisch richtig beschrieben werden.

Spineffekte werden zur Zeit verstärkt untersucht, da sie im Zusammenhang mit der Quanteninformationsverarbeitung, also der Verarbeitung von Information nach quantenmechanischen Regeln, als ideales quantenmechanisches System diskutiert werden. Dabei wäre es wünschenswert, Spineffekte auch in Halbleitersystemen ausnutzen zu können, da dann auf die bewährten und technologisch ausgereiften Verfahren zur Massenherstellung von Bauelementen der Mikroelektronik zurückgegriffen werden könnte. Die kleinsten Systeme in Halbleiterstrukturen stellen Quantenpunkte dar. Diese winzigen Strukturen besitzen Abmessungen von wenigen Nanometern und wurden um 1990 erstmals erwähnt [2]. Die elektronischen Zustände in diesen Quantenpunkten können nur quantenmechanisch berechnet werden und man erhält diskrete, gebundene Zustände, ähnlich wie für elektronische Zustände natürlicher Atome. Deshalb werden derartige Halbleiterquantenpunkte auch häufig als „künstliche Atome“ bezeichnet. Im Gegensatz zu natürlichen Atomen können die Eigenschaften von Halbleiterquantenpunkten fast beliebig, jedoch definiert verändert werden [3].

Zur Herstellung von Halbleiterquantenpunkten ist der Einsatz der modernsten Verfahren der Mikroelektronik und sogar darüber hinausgehender, innovativer Technologien notwendig. Häufig geht man von mittels Molekularstrahlepitaxie hergestellten Schichtstrukturen aus, die ein zweidimensionales Elektronengas enthalten. An solchen Systemen können quantenmechanische Effekte, wie der 1980 gefundene Quanten-Halleffekt und eine ganze Anzahl verschiedener Wechselwirkungs- und Spineffekte beobachtet werden (jüngste Arbeiten siehe

---

\* Vortrag gehalten beim Kolloquium anlässlich der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 27. Mai 2005.

[4,5,6,7]) . Um Quantenpunkte zu erhalten, müssen diese Schichtsysteme noch mittels Lithographietechniken strukturiert werden. Hierzu müssen entweder Elektronenstrahlolithographietechniken [8] oder innovativere Verfahren wie das Direktschreiben mit dem Rasterkraftmikroskop [9] eingesetzt werden. Jedoch kann auch die Natur zu Hilfe genommen werden, um Halbleiterquantenpunkte ganz ohne aufwändige Technologie herzustellen. Beim Wachstum von gitterfehlangepassten Schichten auf einem Substrat können aufgrund des Stranski-Krastanov-Wachstums anstatt ebener Schichten kleine Materialinseln, selbstorganisierte Quantenpunkte, entstehen [10].

Bevor man über die quantenmechanische Beschreibung von Quantenpunkten beim Tunneln nachdenkt, ist es zuerst interessant, die Elektrostatik dieser winzigen Quantenpunkte zu betrachten. Aufgrund ihrer geringen Abmessungen ist ihre elektrische Kapazität zur Umgebung ebenfalls sehr klein. Damit kann jedoch die Lade-Energie, die aufgewendet werden muss, um ein zusätzliches Elektron auf den Quantenpunkt zu bringen, und die umgekehrt proportional zur Kapazität ist, sehr groß werden. Ist die Lade-Energie deutlich größer als thermische Fluktuationen, kann an solchen Quantenpunkten das Laden mit einzelnen Elektronen beobachtet werden, ja es ist sogar möglich, Quantenpunkte, die nur ein zusätzliches Elektron enthalten, zu untersuchen. Die Energiezustände, auf die Elektronen tunneln können, werden ja, wie oben erwähnt, durch die Quantenmechanik beschrieben. In unserem Zusammenhang ist der Eigendrehimpuls, der Spin des Elektrons, der quantenmechanisch zwei Einstellmöglichkeiten aufweist und deshalb für die Quanteninformationsverarbeitung von besonderem Interesse ist, wichtig. Im Magnetfeld können für diese zwei Einstellmöglichkeiten eines Elektronenspins – parallel oder antiparallel zur Magnetfeldrichtung – Energieunterschiede beobachtet werden. Kürzlich gelang es für ein einzelnes Elektron in einem Quantenpunkt diesen Energieunterschied genau zu vermessen [11]. Dabei stellte es sich heraus, dass dieser Energieunterschied von der Magnetfeldrichtung in Bezug auf die scheibenförmige Geometrie des Quantenpunktes abhängt. Dies konnte auf den Einfluss der Spin-Bahn-Wechselwirkung zurückgeführt werden. Damit gelang es erstmals die maßgeblichen Parameter der Spin-Bahn-Wechselwirkung an einem Halbleitersystem quantitativ zu bestimmen. Dies eröffnet die Möglichkeit über Wahl der Richtung und der Stärke des Magnetfeldes gezielt die elektronischen Zustände der einzelnen Elektronen zu beeinflussen. In hohen Magnetfeldern führen nicht nur Spineffekte in den Quantenpunkten, sondern auch in den Zuleitungen, aus denen die Elektronen in die Quantenpunkte tunneln, bzw. in die sie tunneln, zu messbaren Effekten, da der Energieunterschied für die beiden Spinrichtungen so groß wird, dass die Zuleitungen effektiv spinpolarisiert werden. Damit kann nur noch aus Zuständen einer Spinrichtung getunnelt werden. Dies ermöglicht die Untersuchung von Spinstrukturen für Systeme von in großen Bereichen variierenden Elektronenzahlen, ausgehend von den schon erwähnten Quanten-



punkten mit einzelnen Elektronen bis hin zu Quantenpunkten mit mehreren hundert Elektronen, gekoppelten Quantenpunktsystemen [12] und Quantenringen [13]

Für die Quanteninformationsverarbeitung ist es, über das Verständnis der Spineffekte in Quantenpunkten hinaus, auch notwendig, Informationen über die Spinstrukturen eines Quantenpunktes ohne direkte Beeinflussung desselben, d.h. ohne das Tunneln eines zusätzlichen Elektrons in den Quantenpunkt, zu erhalten. Hierzu können elektrostatisch ankoppelnde Quantenpunktkontakte eingesetzt werden. Auf diese Weise ist es schon gelungen, Informationen über Spinstrukturen und Umladungsvorgänge [14] und damit über quantenmechanische Zustände in Quantenpunkten zu erhalten. Damit sind erste Schritte im Hinblick auf den Einsatz von Quantenpunkten als Bausteine der Quanteninformationsverarbeitung, bei der nach quantenmechanischen Regeln gerechnet wird und bei der quantenmechanische Zustände ausgelesen werden, getan.

### Literatur

- [1] O. STERN & W. GERLACH: Zeitschrift für Physik 8, 100 (1921) und 9, 349 (1922).
- [2] R.J. HAUG, K.Y. LEE & J.M. HONG: Mat. Res. Soc. EA-26, 29 (1990).
- [3] R.J. HAUG: Advances in Solid State Physics 34, 219 (1994).
- [4] F. HOHLS, U. ZEITLER & R.J. HAUG: Phys. Rev. Lett. 88, 036802 (2002).
- [5] F. SCHULZE-WISCHELER, E. MARIANI, F. HOHLS & R.J. HAUG, Phys. Rev. Lett. 92, 156401 (2004).
- [6] F. SCHULZE-WISCHELER, F. HOHLS, U. ZEITLER, D. REUTER, A.D. WIECK & R.J. HAUG: Phys. Rev. Lett. 93, 026801 (2004).
- [7] G. SUKHODUB, F. HOHLS & R.J. HAUG: Phys. Rev. Lett. 93, 196861 (2004).
- [8] K.Y. LEE, D.P. KERN, K. ISMAIL, R.J. HAUG, T.P. SMITH, W.I. MASSELINK & J.M. HONG: J. Vac. Sci. Technology B8, 1366 (1990).
- [9] H.W. SCHUMACHER, U.F. KEYSER, U. ZEITLER, R.J. HAUG & K. EBERL: Appl. Phys. Lett. 75, 457 (2000), U.F. Keyser, H.W. Schumacher, U. Zeitler, R.J. Haug, K. Eberl, Appl. Phys. Lett. 76, 457 (2000)
- [10] I. HAPKE-WURST, U. ZEITLER, U.F. KEYSER, R.J. HAUG, K. PIERZ & Z. MA: Appl. Phys. Lett. 82, 1209 (2003).
- [11] J. KÖNEMANN, R.J. HAUG, D.K. MAUDE, V.I. FALKO & B.L. ALTSHULER: Phys. Rev. Lett. 94, 226404 (2005).

- [12] M.C. ROGGE, C. FÜHNER, U.F. KEYSER & R.J. HAUG: Appl. Phys. Lett. 85, 606 (2004).
- [13] U. F. KEYSER, C. FÜHNER, S. BORCK, R.J. HAUG, M. BICHLER, G. ABSTREITER & W. WEGSCHEIDER: Phys. Rev. Lett. 90, 196601 (2003)
- [14] C. FRICKE, M.C. ROGGE, B. HARKE, M. REINWALD, W. WEGSCHEIDER, F. HOHLS & R.J. HAUG: Phys. Rev. B 72, 193302 (2005)

# **Vermessung elektronischer Wellenfunktionen in Halbleitern: Von Quantenpunkten zu komplexeren Systemen\***

MARKUS MORGENSTERN

RWTH Aachen, 2. Physik, Institut B  
Huyskensweg, D-52074 Aachen,  
email: mmorgens@physik.rwth-aachen.de

Mit Hilfe der Rastertunnelspektroskopie bei tiefen Temperaturen ist die lokale elektronische Zustandsdichte des III-V-Halbleiters InAs in verschiedenen Dimensionen vermessen worden. Dabei wurde neben der Dimension auch das externe Magnetfeld und die Unordnung als thermodynamische Parameter variiert. In nulldimensionalen Quantenpunkten konnten einzelne Wellenfunktionen abgebildet werden. In höherdimensionalen Systemen wurden stets mehrere Wellenfunktionen gleichzeitig abgebildet. Unterschiedliche Effekte wie Perkolation, schwache Lokalisierung, Driftzustände im Magnetfeld oder partielle Lokalisierung im extremen Quantenlimit konnten im Realraum dargestellt werden.

## **1. Einleitung**

III-V-Halbleiter haben sich mittlerweile als klassisches Beispielsystem zur Untersuchung wechselwirkender Elektronen etabliert. Ihre wesentlichen Vorteile sind die Einfachheit des nahezu parabolischen Leitungsbandes mit vornehmlichem s-Charakter sowie die weitgehende Einstellbarkeit der Parameter, die das Verhalten des Elektronensystems beeinflussen. Insbesondere sind Dimension, Elektronendichte, Unordnung und Magnetfeld direkt einstellbar. Verschiedenste Elektronenphasen sind erzeugt und nachgewiesen worden, so z.B. Luttingerflüssigkeiten [1], composite Fermionen [2], Streifenphasen bei halbzahligen Füllfaktor [3] oder schwach lokalisierte Elektronen [4].

Eine Herausforderung bleibt es, die verschiedenen Phasen im Realraum abzubilden. In letzter Zeit sind vor allem Rastersondenmethoden eingesetzt worden,

---

\* Vortrag gehalten beim Kolloquium anlässlich der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 27. Mai 2005.

um zusätzliche lokale Informationen über das Verhalten der Elektronensysteme zu erlangen. Insbesondere sind dies die Rastertunnelspektroskopie [5], die Rasterkapazitätsspektroskopie [6], die elektrostatische Rasterkraftmikroskopie [7], ein auf einer Rastersondenspitze montierter Einzelelektronentransistor [8], das sogenannte gerasterte Gate [9] sowie die Rasternahfeldmikroskopie [10]. Jede dieser Methoden hat ihre spezifischen Vor- und Nachteile bezüglich lateraler Auflösung, detektierter Messgröße, Beeinflussung der Probe durch die Sonde, vertikaler Reichweite, Einsetzbarkeit unter extremen Temperaturen und Magnetfeldern sowie möglicher Zeitauflösung [11]. Neben der Visualisierung verschiedenster Effekte im Realraum zeigt sich vermehrt, dass die lokale Abbildung auch zu ganz neuen Einblicken in das Elektronenverhalten führt. Beispielsweise konnte ein charakteristisches Auffächern der Elektronenpfade in Quantenpunktkontakten nachgewiesen werden [9] oder die Bedeutung der elektrostatischen Abschirmung für die Lokalisierung im Quanten-Hall-Bereich hochmobiler Proben aufgezeigt werden [8].

Die spezifischen Vorteile der hier diskutierten Rastertunnelspektroskopie (RTS) bestehen in ihrer extremen lateralen Auflösung bis hinab in den atomaren Bereich [12]. Außerdem bildet RTS unmittelbar die Wellenfunktionen des Systems ab, koppelt also sehr direkt an die Anordnung der Elektronen [13]. Letzteres gilt nahezu exakt im Bereich von Fermi-Flüssigkeiten. Inwieweit auch stärker korrelierte System in ihrer lokalen Struktur abbildbar sind, bleibt abzuwarten. Spezifische Nachteile von RTS sind ihre geringe vertikale Reichweite, die es nicht erlaubt die üblichen hochmobilen Proben abzubilden, welche einige zehn nm unter der Oberfläche vergraben sind, außerdem eine mögliche Beeinflussung der Probe durch das elektrostatische Potential der Spitze [14] sowie die Notwendigkeit extremer UHV-Bedingungen, deren Kompatibilität zu bekannten Kühlmechanismen erheblichen Entwicklungsaufwand verlangt. Keiner der Nachteile ist jedoch grundsätzlicher Natur. So sind hochmobile Proben mit größerer Nähe zur Oberfläche denkbar, Proben- und Spitzenpotentiale angleichbar und Kühlmechanismen bis hinein in den Mischkryostatbereich prinzipiell UHV-kompatibel zu gestalten.

Die dargestellten RTS-Messungen demonstrieren das Potential der Methode und sollen in Zukunft im Hinblick auf tiefere Temperaturen, höhere Magnetfelder und höhere Mobilitäten fortgeführt werden, um einen weiteren Bereich des Phasendiagramms quasifreier Elektronen zu erkunden.

## 2. Meßmethode

In der Rastertunnelspektroskopie wird die differentielle Leitfähigkeit  $dI/dV$  des Tunnelkontaktes zwischen Spitze und Probe als Funktion des Ortes  $\underline{x} = (x,y)$  und der angelegten Spannung  $V$  vermessen. Im Rahmen des Tersoff-Haman-

Modells [15] ergibt sich unter der Bedingung kleiner Spannungen im Vergleich zur Austrittsarbeit und relativ konstanter Spitzenzustandsdichte für  $T=0$  K:

$$dI / dV(\underline{x}, V) \propto \rho_{\text{Spitze}}(E = E_F) \cdot LDOS(\underline{x}, E - E_F = eV). \quad (1)$$

Hierbei ist  $\rho_{\text{Spitze}}(E)$  die Spitzenzustandsdichte gemessen an der Fermikante  $E_F$ ,  $LDOS(\underline{x}, E)$  die Probenzustandsdichte und  $T(eV, z)$  der Transmissionskoeffizient der in der Regel exponentiell vom Spitze-Probe-Abstand  $z$  abhängt.

In allen Fällen, in denen sich die Gesamtwellenfunktion des Elektronensystems als antisymmetrisierte Produktwellenfunktion darstellen läßt, ist die  $LDOS$  einfach die Summe aller quadrierten Wellenfunktionen bei der entsprechenden Energie. Im Falle endlicher Temperaturen ( $T > 0$  K) ergibt sich zusätzlich eine nahezu gaußförmige Energieauflösungsfunktion  $f(E)$  der vollen Halbwertsbreite  $3.3 kT$ , die mit der Energieverteilung der Wellenfunktionen gefaltet werden muss. In realen Experimenten muß zur Berechnung der Auflösungsfunktion schließlich noch die überlagerte Wechselspannung  $V_{\text{mod}}$  berücksichtigt werden, die als Referenzsignal für die Lock-In-Aufnahme von  $dI/dV$  dient. Es ergibt sich eine Energieauflösung von [5]:

$$\Delta E \propto \sqrt{(3.3 \cdot kT)^2 + (2.5 \cdot V_{\text{mod}})^2} \quad (2)$$

Die gemessene lokale Zustandsdichte ergibt sich dann zu:

$$LDOS(\underline{x}, E) \propto \sum_i |\Psi_i(\underline{x}, E_i)|^2 \cdot f(E_i - E) \quad (3)$$

Prinzipiell misst man also die Summe quadrierter Wellenfunktionen in einem bestimmten Energiefenster.

Tatsächlich sind noch vier messtechnische Probleme zu berücksichtigen:

- 1) Das Tersoff-Haman-Modell basiert auf der Annahme einer s-artigen Spitzenzustandsdichte, die in der Regel für W-Spitzen nicht zutrifft. Chen konnte jedoch zeigen, dass die Verwendung anderer Spitzenorbitale mit Hilfe einer sogenannten Ableitungsregel beschrieben werden kann [16]. Da in RTS-Messungen ausschließlich z-artige Orbitale signifikant zum Tunnelstrom beitragen, lautet die Regel: Das Produkt  $LDOS(\underline{x}, E) \cdot T(E, z)$  muß  $l$  mal nach  $z$  abgeleitet werden, wenn ein Spitzenzustand der Drehimpulsquantenzahl  $l$  den Tunnelstrom trägt. Ist der Transmissionskoeffizient  $T$  räumlich homogen und exponentiell abstandsabhängig, so führt dies nur zu einem zusätzlichen Vorfaktor in Gleichung (1). Die Gleichung bleibt also im Rahmen der Proportionalität identisch. Tatsächlich lässt sich experimentell nachweisen, dass räumliche Homogenität und exponentielle Abstandsabhängigkeit von  $T$  für die Leitungsbandzustände des InAs gegeben ist [5].

- 2) RTS-Messungen werden in der Regel nicht bei konstantem Abstand  $z$  durchgeführt, sondern bei konstanten Regelparametern  $I_{stab}$  und  $V_{stab}$ , so dass  $T(z)$  eine Ortsabhängigkeit aufweist. Der Effekt kann jedoch durch eine geeignete Normierung der Messdaten kompensiert werden, so dass tatsächlich die LDOS dargestellt wird [17].
- 3) Untersucht man Elektronensysteme nahe isolierendem Verhalten, so kann der Tunnelstrom zu Aufladungseffekten führen, die zusätzlichen Potentialunordnungen entsprechen [18]. Ein geeigneter Test ist die kontinuierliche Reduktion des Tunnelstroms, die im Falle einer Aufladung zur Veränderung des abgebildeten Elektronenmusters führt. Messungen sollten unterhalb der Veränderungsgrenze durchgeführt werden.
- 4) Die Austrittsarbeiten von Tunnelspitze und Probe können unterschiedlich sein, was eine lokale Bandverbiegung in Halbleiterproben zur Folge hat [14]. Da die Spannung Messparameter ist, kann sie nicht zur Kompensation dieses Problems verwendet werden. Man kann jedoch die Bandverbiegung anhand spitzeninduzierter Zustände bzw. einem verschobenen Leitungsbandeinsatz in  $dI/dV(V)$ -Kurven identifizieren [14]. Da sie von den Details der Spitzegeometrie abhängt, lässt sie sich darüberhinaus mittels Spitzenpräparation modifizieren. Ein langwieriger aber funktionierender Prozess ist es, die Spitze solange zu modifizieren, bis sie im interessierenden Spannungsbereich faktisch keine Bandverbiegung mehr aufweist.

Berücksichtigt man diese Aspekte adäquat, so kann man in der Tat die Summe quadrierter Wellenfunktionen mittels RTS abbilden.

### 3. Experimenteller Aufbau

Da die Temperatur zentral die Energieauflösung eines RTS-Experiments bestimmt, sind Experimente bei tiefen Temperaturen wünschenswert. Außerdem sind insbesondere Halbleiterproben extrem sensitiv auf Verunreinigungen, so dass UHV-Bedingungen unabdingbare Voraussetzung für reproduzierbare Messungen sind. Schließlich ist auf extreme Vibrationsarmut im Bereich des Tunnelkontaktes zu achten. Bisher sind Kombination bis hinab zu 300 mK basierend auf der Kühlung mit flüssigem  $^3\text{He}$  realisiert [19], während sich Geräte mit Mischkryostaten noch im Entwicklungsstadium befinden [20].

Eine Beschreibung des in Hamburg realisierten 300 mK-Systems findet man in [21]. Abb.1 zeigt Messungen zur realisierten Energieauflösung. Geeignetes Testobjekt sind die Quasiteilchenpeaks der Einteilchenzustandsdichte eines Supraleiters. Abb. 1a zeigt die vermessene supraleitende Bandlücke von  $\text{NbSe}_2$  als Funktion der Probestemperatur. Deutlich erkennbar ist die Aufsteilung der Quasiteilchenpeaks mit abnehmender Temperatur. Allerdings weist  $\text{NbSe}_2$  eine anisotrope Bandlücke auf [22], die zu einer intrinsischen Verschmierung der

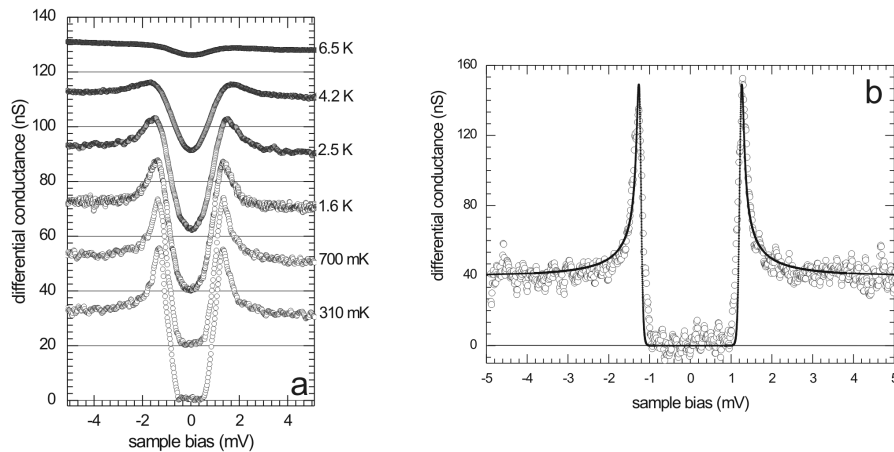


Abb. 1: Energieauflösungsmessungen zur Rastertunnelspektroskopie

(a)  $dI/dV(V)$ -Kurven die mittels W-Spitze bei den angegebenen Temperaturen auf  $\text{NbSe}_2(0001)$  vermessen wurden,  $V_{\text{mod}} = 24 \mu\text{V}_{\text{rms}}$ ,  $B = 0 \text{ T}$ ; (b)  $dI/dV(V)$ -Kurve die mittels Nb-Spitze auf W(110) vermessen wurde,  $T = 315 \text{ mK}$ ,  $V_{\text{mod}} = 24 \mu\text{V}_{\text{rms}}$ ,  $B = 0 \text{ T}$ ; die durchgezogene Linie entspricht dem erwarteten Verlauf der Kurve bei einer Elektronentemperatur von 315 mK [20].

Quasiteilchenpeaks führt. Für quantitative Messungen der Energieauflösung benötigt man ergo isotrope Supraleiter wie z.B. Nb. Abb. 1b zeigt die bei 315 mK vermessene Bandlücke eines Nb-W-Tunnelkontaktes. Durch Anpassung einer Fitkurve läßt sich die effektive Elektronentemperatur zu  $350 \pm 35 \text{ mK}$  bestimmen entsprechend einer Energieauflösung von  $100 \mu\text{eV}$ .

Im Hinblick auf die Messungen an InAs-Systemen bedeutet dies, daß etwa 10 Zustände zur  $LDOS$  eines 2D-Systems im Bereich von  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$  beitragen.

Die nun folgenden Messungen sind jedoch weitgehend bei  $T = 6 \text{ K}$  aufgenommen [23], so daß sie sich aus 20 mal mehr Wellenfunktionen konstituieren.

#### 4. Messungen an Quantenpunkten

Die einfachste Möglichkeit die Anzahl der Wellenfunktion auf eins zu reduzieren besteht in einem vollständigen Einschlußpotential, das energetisch deutlich getrennte Einzelwellenfunktionen zur Folge hat. Als experimentelle Realisierung haben wir verspannungsinduzierte InAs-Quantenpunkte auf einem GaAs(001)-Substrat verwendet, die typische Energieabstände der Zustände von 50 meV aufweisen. Sie sind vom leitfähigen Substrat durch eine 15 nm dicke

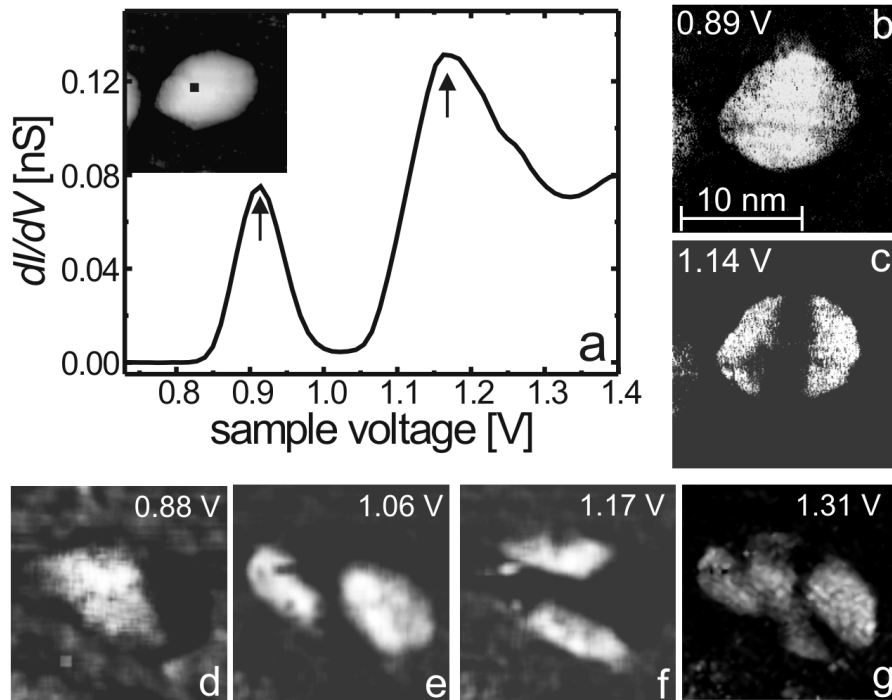


Abb. 2: Vermessung einzelner Wellenfunktionen in Quantenpunkten

(a)  $dI/dV(V)$ -Kurve gemessen oberhalb eines InAs-Quantenpunktes; der Messpunkt ist als schwarzer Punkt im Topographiebild (Inset) markiert; die Pfeile zeigen die Spannungen an, bei denen die lateral aufgelöste Intensität in Abb. 2 b und c dargestellt ist; (b), (c)  $dI/dV(\underline{x})$ -Bilder des Quantenpunktes von (a) aufgenommen bei den angegebenen Spannungen; (d)-(g)  $dI/dV(\underline{x})$ -Bilder eines anderen Quantenpunktes, der vier Zustandsdichtepeaks in  $dI/dV(V)$ -Kurven aufweist; die Bilder sind bei den Peakspannungen aufgenommen;  $V_{\text{mod}} = 28 \text{ mV}_{\text{rms}}$ ,  $B = 0 \text{ T}$ ,  $T = 6 \text{ K}$  [23].

Tunnelbarriere aus undotiertem GaAs getrennt. Es hat sich als entscheidend herausgestellt, die Quantenpunktproben komplett unter UHV-Bedingungen von der herstellenden MBE-Anlage in die RTS-Anlage zu transferieren.

Abb. 2a zeigt ein lokales  $dI/dV$ -Spektrum eines Quantenpunktes (Inset), in dem 2 Peaks die eingeschlossenen Zustände repräsentieren. Ortsaufgelöste Daten der Peakintensität sind in Abb. 2b und c zu sehen. Diese entsprechen schlicht dem  $|\psi_i(\underline{x})|^2$  der entsprechenden Wellenfunktionen und erinnern an s- und p-artige Zustände eines H-Atoms. Solche Zustände haben wir mittlerweile an weit mehr als 50 Quantenpunkten vermessen und es zeigt sich, dass jeder Quantenpunkt leicht unterschiedliche Zustände aufweist, die bis zu 3 Knoten



in eine Richtung entsprechend einem f-artigen Zustand zeigen [24]. Abbildung 2d-g zeigt die vier Zustände eines weiteren Quantenpunktes. Neben dem Demonstrationscharakter, einzelne Zustände in Halbleitern abbilden zu können, sind die Messungen auch für detaillierte Vergleiche mit Rechnungen von Interesse, die momentan von verschiedener Seite durchgeführt werden.

## 5. Messungen in verschiedener Dimension sowie im Magnetfeld

Die geringe vertikale Reichweite von RTS sowie die notwendige UHV-Kompatibilität des Herstellungsprozesses, verlangt es, neue Prozesse jenseits der etablierten MBE- und Reinraummethoden zur Herstellung niederdimensionaler Systeme zu entwickeln. Als besonders effektiv hat sich die Verwendung von in-situ gespaltenen InAs(110)-Proben erwiesen. Diese haben zunächst den Vorteil, dass Oberflächenzustände mehr als 1 eV von den Bandkanten entfernt sind und deshalb Messungen der Leitungsbandelektronen im Bereich von ca. 100 meV oberhalb der Leitungsbandkante nicht beeinflussen [25]. Das dreidimensionale Leitungsband ist somit unmittelbar zugänglich. Zweidimensionale Systeme lassen sich darüberhinaus durch eine gezielte Oberflächendotierung einfach im UHV erzeugen [26], indem man Adsorbate im Bereich von ca. 1 % einer Monolage aufbringt. Zufällig zeigt die InAs(110)-Oberfläche auch positiv geladene Stufenkanten in [112]-Richtung, die als eindimensionale Elektronenkanäle fungieren [27]. Nulldimensionale Systeme sind bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, können aber auch auf InAs(110) erzeugt werden. Die wesentliche Idee ist es, den Austrittsenergieunterschied zwischen Probe und Spitze nicht zu kompensieren, sondern gezielt zu nutzen, um ein Einschlusspotential unterhalb der Spitze zu erzeugen [14]. Die quantisierten Zustände lassen sich so zwar nicht abbilden aber spektroskopieren. Gegenüber den verspannungsinduzierten Quantenpunkten ist dieser spitzeninduzierte Quantenpunkt erheblich größer, so dass Einflüsse von Magnetfeld und Wechselwirkung sehr viel besser studiert werden können [28].

Nachteile der so präparierten Elektronensysteme sind einerseits die intrinsische Unordnung des Systems, die durch die Entartungsdotierung des InAs vorgegeben ist und die Tatsache dass sich die Elektronendichte nicht in-situ einstellen lässt, da keine Gate-Elektrode vorhanden ist.

Ein entscheidender Vorteil ist es, dass Methoden entwickelt worden sind, im Bereich der abgebildeten Zustandsdichte auch das Unordnungspotential abbilden zu können [5].

Abb. 3 zeigt einen Überblick über die auf InAs(110) erzielten *LDOS*-Daten in unterschiedlicher Dimension sowie mit und ohne Magnetfeld. Klar erkennbar sind die unterschiedlichen Erscheinungsformen der *LDOS* bei Variation der bestimmenden Parameter.

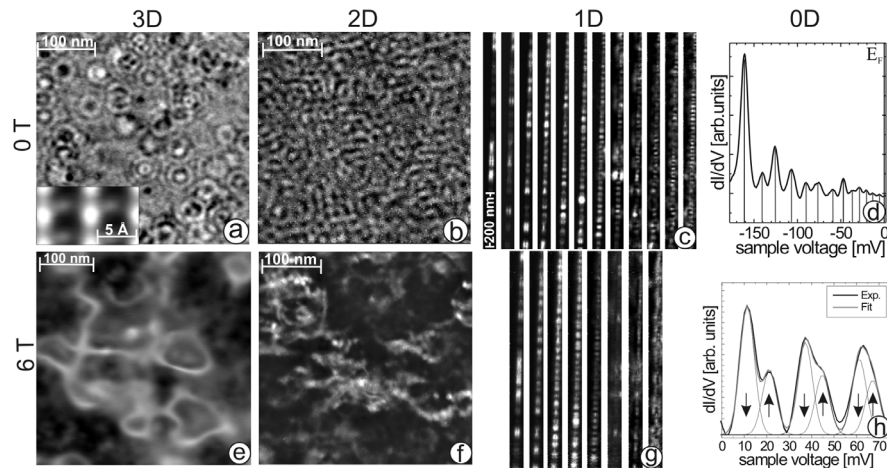
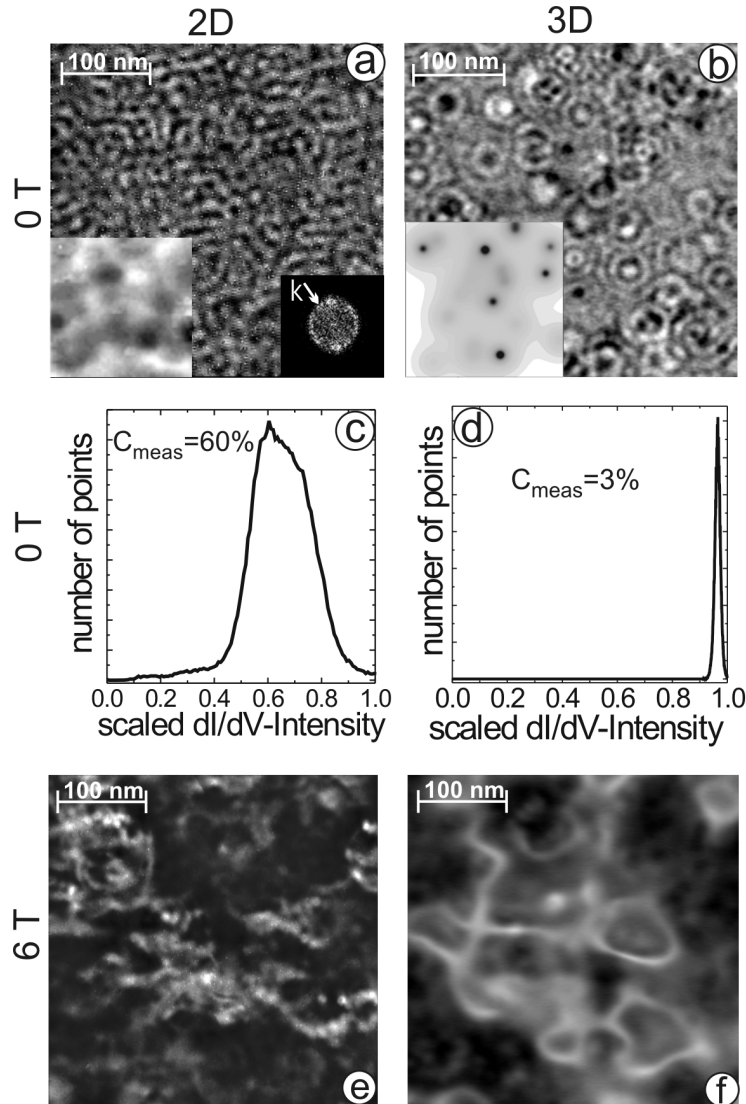


Abb. 3: Bilder der *LDOS* des InAs Leitungsbandes in verschiedener Dimension bei  $B = 0$  T und  $B = 6$  T

(a) 3DES,  $E_{\text{kin}} = 50$  meV,  $B = 0$  T; Inset zeigt die atomare Periodizität der untersuchten Blochwellen [17,24]; (b) 2DES,  $E_{\text{kin}} = 60$  meV,  $B = 0$  T [29]; (c) 1DES,  $E_{\text{kin}} = 0-75$  meV (v. li. n. re.),  $B = 0$  T [26]; (d)  $dI/dV(V)$ -Spektrum eines spitzeninduzierten Quantenpunktes mit markierten Peakspannungen,  $B = 0$  T [14]; (e) 3DES,  $E_{\text{kin}} = 60$  meV,  $B = 6$  T [28]; (f) 2DES,  $E_{\text{kin}} = 60$  meV,  $B = 6$  T [28]; (g) 1DES,  $E_{\text{kin}} = 5-75$  meV (v. li. n. re.),  $B = 6$  T; (h)  $dI/dV(V)$ -Spektrum eines spitzeninduzierten Quantenpunktes bei  $B = 6$  T mit gaußförmigen Fitkurven, die je einem spinpolarisierten Zustand entsprechend dem markierten Pfeil zugeordnet sind [27]; Bezugspunkt der Energie  $E_{\text{kin}}$  ist stets das Leitungsbandminimum.

Die einzelnen Beobachtungen sind im Detail in der Literatur beschrieben [5,14,17,27,28-31]. Abb. 4 zeigt einen Vergleich von 2DES und 3DES-Daten mit und ohne Magnetfeld. Die vermessenen Potentialunordnungen sind in Abb. 4a und b als Inset dargestellt und es zeigt sich, dass diese jeweils durch die Hintergrunddotierung bestimmt sind und somit in 2DES und 3DES weitgehend identisch sind. Trotzdem findet man zentrale Unterschiede der *LDOS* bei  $B = 0$  T. Während die Wellenfunktionen in 3D zirkulare Korrugationsmuster um einzelne Dotieratome aufweisen, erscheint das Wellenmuster im 2D-Fall deutlich komplexer und besteht aus einer Mischung ebener und zirkularer Wellen einer präferentiellen Wellenlänge, die in der Fouriertransformation (Inset) direkt als Ring sichtbar wird. Außerdem ist die Korrugation im 2D-Fall etwa 20 mal stärker als im 3D-Fall, wie in Abb. 4c und d gezeigt. Wir vermuten, dass beide Unterschiede durch die Tendenz des 2D-Systems zur schwachen Lokalisierung hervorgerufen werden [30]. Während phasenfixierte Streuanteile der Wellenfunktionen in 3D im wesentlichen durch Einfachstreuung an Dotieratomen hervorgerufen werden, sind in 2D komplexere Streupfade charakteristisch, welche in der Konsequenz die schwache Lokalisierung ausmachen. Ausserdem ist

Abb. 4: Vergleich der *LDOS* in 2D und 3D

(a) 2DES,  $E_{\text{kin}} = 60$  meV,  $B = 0$  T; Inset links: Potentialunordnung mit Fluktuationen von  $\pm 15$  meV; Inset rechts: Fouriertransformation des Realraumbildes mit markiertem präferentiellen  $k$ -Vektor [29]; (b) 3DES,  $E_{\text{kin}} = 50$  meV,  $B = 0$  T; Inset: Potentialunordnung mit Fluktuationen von  $\pm 15$  meV [17,27]; (c), (d): Histogramme der  $dI/dV$ -Werte in den Bildern von (a) bzw. (b); die angegebene Korrugation  $C_{\text{meas}}$  berechnet sich als Quotient aus Halbwertsbreite der Verteilung durch mittleren  $dI/dV$ -Wert [28]; (e) 3DES,  $E_{\text{kin}} = 60$  meV,  $B = 6$  T [28]; (f) 2DES,  $E_{\text{kin}} = 60$  meV,  $B = 6$  T [28].

die Korrugationsstärke ein direktes Maß für den phasenfixierten Anteil der Wellenfunktionen, der in 2D dem lokalisierten Anteil ähnlich ist.

Legt man ein  $B$ -Feld von 6 T an, so findet man sehr viel größere Ähnlichkeit zwischen 2D und 3D. Die LDOS besteht in beiden Fällen aus sich schlängelnden Pfaden, wie man sie von Driftzuständen erwartet [32]. Ausserdem wird der Korrugationsunterschied deutlich reduziert. Er beträgt in 2D 80 % und in 3D 20 %. Eine detaillierte Analyse möglicher Messfehler zeigt dass die Schlangenstrukturen in der Tat *LDOS*-Muster sind, deren mittlere Breite die magnetische Länge ist und deren Strukturgröße den Potentialfluktuationen entspricht [31]. Es ist also zu schließen, dass Driftzustände, wie sie bisher ausschliesslich in 2D vorausgesagt waren [32], auch in 3D existieren. Bisherige Messungen an InAs und InSb legen nahe, dass hierzu die kinetische Energie des Systems erheblich reduziert werden muss, so dass der Effekt ausschliesslich im extremen Quantenlimes auftritt. Ein mögliches Szenario wäre eine partielle Lokalisierung der Wellenfunktionen parallel zum Magnetfeld, so dass das System in 2D-artige Pfützen zerfällt [31].

## 6. Variation der Unordnung

Als weiterer wesentlicher Parameter ist partiell die Unordnung variiert worden. Dies läßt sich durch Variation der Probendotierung sowie geringere Oberflächendotierung in 2D-Systemen zumindest in Richtung stärkerer Unordnung leicht bewerkstelligen [26]. Es zeigt sich, dass bei Unordnungen, die wesentlich stärker als die kinetische Energie des Systems sind, der Wellenfunktionscharakter der Zustände fast vollständig verloren geht und das System einen nahezu klassischen Perkulationsübergang von stark lokalisierten zu schwach lokalisierten Zuständen zeigt [33]. Interessanterweise zeigt das System in Übereinstimmung mit theoretischen Voraussagen [34] lokale Landauquantisierungen, die in der lateral gemittelten Zustandsdichte nicht sichtbar sind [34].

## 7. Zusammenfassung

Die Möglichkeiten mittels RTS die *LDOS* eines III-V-Halbleiters in verschiedener Dimension sowie mit und ohne Magnetfeld abzubilden wurden anhand einiger Beispiele basierend auf Elektronen des InAs-Leitungsbandes dargestellt. Die Vielfältigkeit des Phasendiagramms der III-V-Halbleiter erlaubt gewiss noch viele weitere Elektronenphasen zu untersuchen und deren Existenz unmittelbar nachzuweisen. Eine spannende Frage ist sicherlich, inwieweit auch die laterale Verteilung stark wechselwirkender Systeme mittels RTS abgebildet werden kann. Essentiell hierfür ist die Entwicklung RTS-kompatibler, hochmobiler Proben sowie das weitere Fortschreiten zu tieferen Temperaturen und höheren Magnetfeldern.

## Literatur

- [1] AUSLAENDER, O.M., A. YACOBY, R. DE PICCIOTTO, K. W. BALDWIN, L. N. PFEIFFER & K. W. WEST: *Science* **295** (2002) 825; AUSLAENDER, O. M., H. STEINBERG, A. YACOBY, Y. TSEKOVNYAK, B. I. HALPERIN, K. W. BALDWIN, L. N. PFEIFFER & K. W. WEST: *Science* **308** (2005) 88.
- [2] TSUI, D. C., H. L. STÖRMER & A. C. GOSSARD: *Phys. Rev. Lett.* **48** (1982) 1559; KUKUSHKIN, I.V., J.H. SMET, K. VON KLITZING & W. WEGSCHEIDER, *Nature* **415** (2002) 409.
- [3] LILLY, M.P., K. B. COOPER, J. P. EISENSTEIN, L. N. PFEIFFER & K. W. WEST: *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 394.
- [4] SIMMONS, M. Y, A. R. HAMILTON, M. PEPPER, E. H. LINFIELD, P. D. ROSE & D. A. RITCHIE: *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 2489; ILANI, S., A. YACOBY, D. MAHALU & H. SHRIKMAN: *Science* **292** (2001) 1354.
- [5] MORGENSTERN, M.: *Physik Journal* **8** (2004) 83; *Surf. Rev. Lett.* **10** (2003) 933; MORGENSTERN, M., D. HAUDE, V. GUDMUNDSON, CHR. WITTNEVEN, R. DOMBROWSKI, CHR. STEINEBACH & R. WIESENDANGER: *J. Electr. Spectr. Rel. Phen.* **109** (2000) 127.
- [6] TESSMER, S. H., P. I. GLICOFRIDIS, R. C. ASHOORI, L. S. LEVITOV & M. R. MELLOCH: *Nature* **392** (1998) 51; FINKELSTEIN, G., P. I. GLICOFRIDIS, R. C. ASHORI & M. SHAYEGAN: *Science* **289** (2000) 90.
- [7] WEITZ, P., E. AHLWEDE, J. WEIS, K. VON KLITZING & K. EBERL: *Physica E* **6** (2000) 247; AHLWEDE, E., J. WEIS, K. V. KLITZING & K. EBERL: *Physica E* **12** (2002) 165.
- [8] ZHITENEV, N.B., T. A. FULTON, A. YACOBY, H. F. HESS, L. N. PFEIFFER & K. W. WEST: *Nature* **404** (2000) 473; MARTIN, J., S. ILANI, B. VERDENE, J. H. SMET, V. UMANSKY, D. MAHALU, D. SCHUH, G. ABSTREITER & A. YACOBY: *Science* **305** (2004) 980; ILANI, S., J. MARTIN, E. TEITELBAUM, J. H. SMET, D. MAHALU, V. UMANSKY & A. YACOBY: *Nature* **427** (2004) 328.
- [9] TOPINKA, M.A., B. J. LEROY, S. E. J. SHAW, E. J. HELLER, R. M. WESTERVELT, K. D. MARANOWSKI & A. C. GOSSARD: *Science* **289** (2000) 2323; TOPINKA, M.A., B. J. LEROY, R. M. WESTERVELT, S. E. J. SHAW, R. FLEISCHMANN, E. J. HELLER, K. D. MARANOWSKI & A. C. GOSSARD: *Nature* **410** (2001) 183; PIODA, A., S. KICIN, T. IHN, M. SIGRIST, A. FUHRER, K. ENSSLIN, A. WEICHSELBAUM, S. E. ULLOA, M. REINWALD & W. WEGSCHEIDER: *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 216801.
- [10] GUEST, R. J., T. H. STIEVATER, G. CHEN, E. A. TABAK, B. G. ORR, D. G. STEEL, D. GAMMON & D. S. KATZER: *Science* **293** (2001) 2224; EYTAN, G., Y. YAYON, M. RAPPAPORT, H. SHRIKMAN & I. BAR-JOSEPH: *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) 1666.
- [11] MORGENSTERN, M.: in "Scanning Probe Microscopy: Electrical and Electromechanical Phenomena at the Nanoscale" ed. by A. Gruverman (Springer, Berlin, 2005), in press.

- [12] WIESENDANGER, R.: Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy (Cambridge University Press, Cambridge 1994).
- [13] MORGENSTERN, M., A. SCHWARZ & U. D. SCHWARZ: in „Springer Nanotechnology Handbook“, ed. by B. Bushan (Springer Verlag, Berlin 2004) chapter 14.
- [14] FEENSTRA, R. M. & J. A. STROSCIO: J. VAC. Sci. Technol. B **5** (1987) 923; DOMBROWSKI, R., CHR. STEINEBACH, CH. WITTNEVEN, M. MORGENSTERN & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. B **59** (1999) 8043.
- [15] TERSOFF, J. & D. R. HAMANN: Phys. Rev. B **31** (1985) 805.
- [16] CHEN, C.J.: Introduction to Scanning Tunneling Microscopy (Oxford University Press, Oxford 1993).
- [17] WITTNEVEN, CHR., M. MORGENSTERN, R. DOMBROWSKI & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 5616.
- [18] RAMACHANDRAN, V. & R. M. FEENSTRA: Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 1000.
- [19] PAN, S. H., E. W. HUDSON & J. C. DAVIS: Rev. Sci. Instr. **70** (1999) 1459; KUGLER, M., CH. RENNER, O. FISCHER, V. MIKHEEV & G. BATEY: Rev. Sci. Instr. **71** (2000) 1475.
- [20] MATSUI, T., H. KAMBARA, I. UEDA, T. SHISHIDO, Y. MIATAKE & H. FUKUYAMA: Physica B **329** (2003) 1653.
- [21] WIEBE, J., A. WACHOWIAK, F. MEIER, D. HAUDE, T. FOSTER, M. MORGENSTERN & R. WIESENDANGER: Rev. Sci. Instr. **75** (2004) 4871.
- [22] YOKOYA, T., T. KISS, A. CHAINANI, S. SHIN, M. NOHARA & H. TAKAGI: Science **294** (2001) 2518.
- [23] WITTNEVEN, C., R. DOMBROWSKI, S.H. PAN & R. WIESENDANGER: Rev. Sci. Instr. **68** (1997) 3806.
- [24] MALTEZOPOLOUS, T., A. BOLZ, C. MEYER, C. HEYN, W. HANSEN, M. MORGENSTERN & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 196804.
- [25] KLIJN, J., L. SACHAROW, CHR. MEYER, S. BLÜGEL, M. MORGENSTERN & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. B **68** (2003) 205327.
- [26] ARISTOV, V. YU, G. LELAY, P. SOUKIASSIAN, K. HRICOVINI, J. E. BONNET, J. OSVALD & O. OLSSON: Europhys. Lett. **26** (1994) 359; MORGENSTERN, M., M. GETZLAFF, D. HAUDE, R.L. JOHNSON & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. B **61** (2000) 13805; MORGENSTERN, M., J. WIEBE, A. WACHOWIAK, M. GETZLAFF, J. KLIJN, L. PLUCINSKI, R.L. JOHNSON & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. B **65** (2002) 155325.
- [27] MEYER, CHR., J. KLIJN, M. MORGENSTERN & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. Lett. **91** (2003) 076803.

- [28] MORGENSTERN, M., V. GUDMUNDSSON, R. DOMBROWSKI, CHR. WITTNEVEN & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. B **63** (2001) 201301.
- [29] HAUDE, D., M. MORGENSTERN, I. MEINEL & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 1582; MORGENSTERN, M., J. KLIJN, CHR. MEYER & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 056804; MORGENSTERN, M., D. HAUDE, V. GUDMUNDSSON, CHR. WITTNEVEN, R. DOMBROWSKI & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. B **62** (2000) 7257.
- [30] MORGENSTERN, M., J. KLIJN, CHR. MEYER, M. GETZLAFF, R. ADELUNG, K. ROSSNAGEL, L. KIPP, M. SKIBOWSKI & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 136806.
- [31] MORGENSTERN, M., D. HAUDE, CHR. MEYER & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. B **64** (2001) 205104.
- [32] JOYNT, R. & R. E. PRANGE: Phys. Rev. B **29** (1984) 3303.
- [33] WIEBE, J., CHR. MEYER, J. KLIJN, M. MORGENSTERN & R. WIESENDANGER: Phys. Rev. B **68** (2003) 041402.
- [34] RUDIN, A.M., I. L. ALEINER & L. I. GLAZMAN: Phys. Rev. B **58** (1998) 5698.
- [35] WIEBE, J., M. MORGENSTERN & R. WIESENDANGER: to be published.





## Mit Quanteneffekten zu neuen Halbleiterbauelementen\*

PROF. DR. RER. NAT. GÜNTER WEIMANN

Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik  
Tullastraße 72, D-79108 Freiburg i. Br.

### Einleitung

Halbleiterbauelemente haben unsere Welt verändert, ohne Transistor und Laserdiode wäre die schier unbegrenzte und fast kostenlose Speicherung, Verarbeitung und Übertragung von Daten – und Information – undenkbar. Der Fortschritt in der Mikroelektronik lag für Jahrzehnte in der Skalierung: Immer kleinere Strukturen führten zu immer höheren Integrationsgraden, eröffneten aber auch neue Bauelementfunktionen. Heutige Strukturierungsverfahren, wie z. B. die Molekularstrahlepitaxie eignen sich für die Herstellung von Heterostrukturen – das sind Schichtfolgen aus unterschiedlichen Halbleitern – in Nanometerdimensionen, und damit in der Größenordnung der Materialwellenlänge der Elektronen. Die dabei auftretenden Quanteneffekte führen zu verbesserten Bauelementeigenschaften, so beim Elektronentransport in modulationsdotierten Feldeffekttransistoren oder bei den niedrigen Schwellenströmen von Quantenfilm- und Quantenpunktlasern. Während „konventionelle“ Halbleiterlaser und -detektoren mit Übergängen zwischen Leitungs- und Valenzband, also Interband-Übergängen arbeiten, sind die hier vorgestellten Bauelemente unipolar mit Übergängen zwischen Subbändern im Leitungsband. Sie eröffnen weite Spektralbereiche im Infraroten.

### Neue Bauelemente: QWIPs und QCLs

Heterostrukturbauelemente auf der Basis der III-V-Verbindungshalbleiter sind allgegenwärtig, so z. B. der modulationsdotierte Feldeffekttransistor (MODFET) mit einer GaAs/AlGaAs-Heterostruktur oder der Potentialtopf- oder Quantenfilmlaser (QW-Laser). Der MODFET verdankt seine guten elektrischen Transporteigenschaften der räumlichen Trennung von Elektronen und Donatoratomen. Er ist heute der schnellste bekannte Transistor mit Grenzfrequenzen von über 300 GHz. Sein herausragendes Merkmal ist jedoch sein extrem niedriges Hochfrequenzrauschen, das den Satellitendirekttempfang mit kleinen Antennenschüsseln mit Durchmessern von 0,5 m ermöglicht und so diesem Bauelement

---

\* Vortrag gehalten beim Kolloquium anlässlich der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 27. Mai 2005.

zum breiten Massenmarkt verholfen hat. Einen vergleichbaren Markt hat der QW-Laser in CD- und DVD-Spielern gefunden.

QW-Laser mit einem oder mehreren Potentialtöpfen (SQW oder MQW = single oder multiple quantum well) sind Bauelemente mit zweidimensionalen Elektronen- und Löchergasen, die sich nur in Quantenfilmebene bewegen können. Die zweidimensionale Zustandsdichte führt zu niedrigen Schwellenströmen und hohen Wirkungsgraden – beste Voraussetzung für zuverlässige und langlebige Bauelemente. Die Wellenlänge lässt sich durch Quantenfilmdicke und Potentialbarrieren einstellen.

In diesen Quanteneffekt-Bauelementen sind die Schichtdicken im Nanometerbereich, d. h. Bauelementdimensionen und Materiewellenlängen sind ähnlich, die Wellennatur bestimmt das Verhalten von Elektronen (und Löcher). In GaAs-Quantenfilmen zwischen AlGaAs-Potentialbarrieren bilden sich stehende Wellen aus, nur diskrete Wellenlängen sind erlaubt: Ganzzahlige Vielfache der halben Wellenlänge passen in die Potentialtöpfe, wir erhalten quantisierte Zustände und Subbänder. Sind die Potentialbarrieren dünn, können sie „durchtunnelt“ werden, periodische Halbleiterstrukturen können so Elektronenwellen entweder durchlassen oder reflektieren: Quantenphänomene führen zu neuen Funktionen und neuen Bauelementen.

Die elektronischen Übergänge zwischen den Subbändern können zur Emission und Absorption von Photonen genutzt werden, die Wellenlängen liegen im infraroten Spektralbereich und lassen sich durch Quantenfilmdicke, Barrierendicke und Barrierenhöhe in weiten Bereichen einstellen. Dieses „band structure engineering“ eröffnet zusätzliche Freiheitsgrade zum „materials engineering“ mit der Manipulation der Halbleiterzusammensetzung in ternären und quaternären Legierungen. Ein typischer Infrarotdetektor mit Quantenfilmen (QWIP = quantum well infrared photodetector) für das mittlere IR besteht so z. B. aus 20 Perioden mit 2,6 nm breiten  $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ -Potentialtöpfen und 24 nm breiten  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ -Barrieren. Die Detektion erfolgt durch die Anregung eines im Subband gebundenen Elektrons über die Potentialbarrieren in das Energiekontinuum, beim Anlegen eines elektrischen Feldes fließt ein Photostrom (Abb. 1a). Um ausreichende Absorption zu erhalten, werden die Potentialtöpfe kaskadiert, eine typische Struktur enthält 20 bis 50 Perioden. Die angeregten Elektronen tragen zum Photostrom bei bis zu ihrem Wiederempfang in einem Potentialtopf, wobei dieser Einfang statistisch geschieht, d. h. die Elektronen legen unterschiedliche Wegstrecken zurück. Dies führt zu Stromfluktuationen und damit zum Rauschen des Detektors. Durch Einbau einer zusätzlichen Nanometer-dicken Barriere am Ende einer jeden Periode wird der statistische Einfang deterministisch, jedes angeregte Elektron wird nach Durchlaufen einer, und nur einer, Periode der Struktur eingefangen, das Rauschen des Photostromes wird minimiert (Abb. 1b). Das Ergebnis ist eine extrem hohe thermische Auflösung unserer Wärmebildkameras mit Bestwerten von 5 mK [1].

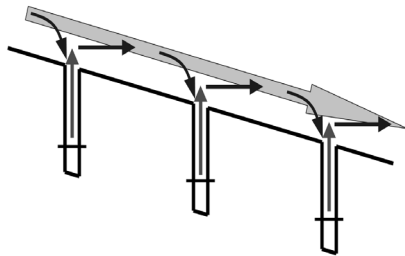


Abb. 1a: Leitungsband einer photoleitenden QWIP-Struktur mit statischem Elektroneneinfang.

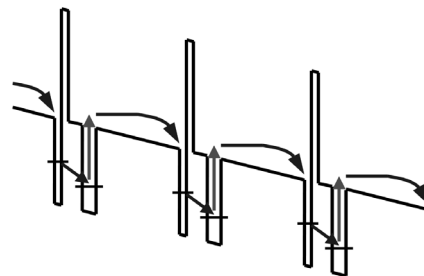


Abb. 1b: Deterministischer Elektroneneinfang durch zusätzlichen Potentialtopf mit Barriere.

Diese mit QWIPs arbeitenden Wärmebildgeräte wurden für die (militärische) Aufklärung entwickelt, die Betriebswellenlängen liegen – um große Reichweiten zu erzielen – in den atmosphärischen Fenstern bei  $3 - 5 \mu\text{m}$  und  $8 - 12 \mu\text{m}$ . Für eine hohe räumliche Auflösung haben diese starrenden Detektoren, die ohne bewegliche Teile auskommen, Bildfeldmatrizen mit hoher Pixelzahl von z. B.  $640 \times 512$ , die Dimension der einzelnen Pixel beträgt  $20 \mu\text{m}$ . Der technologische Entwicklungsstand der QWIPs ist hoch, mehr als 99,9 % der Pixel dieser hochintegrierten Bildfeldmatrizen sind voll funktionsfähig, weniger als 1 % der Bildpunkte sind defekt, wobei diese Defekte dann bei der Bildverarbeitung herausgerechnet werden.

Neue Entwicklungen gehen zu multispektralen Detektoren mit z. B. zwei Detektionswellenlängen. Die einzelnen Wellenlängen liegen entweder im gleichen Fenster, z. B. bei  $3,5$  und  $5 \mu\text{m}$  im mittleren IR, oder in den getrennten atmosphärischen Fenstern. Diese Zwei-Farben-Detektoren bzw. Zwei-Bänder-Detektoren werden durch Stapeln der Einzeldetektoren realisiert, die aktive Struktur wird dann bis zu  $5 \mu\text{m}$  dick und besteht oft aus 100 Einzelschichten.

Die punkt- und zeitgleiche Detektion bei zwei Wellenlängen dient vor allem der Enttarnung, da der bispektrale Detektor gleichzeitig Temperatur und Emissivität der betrachteten Szene messen kann. Übliche Tarnungen bestehen in der Reduktion der Emissivität, die herabgesetzte Emissivität getarnter Objekte ist jetzt auffällig, sie können somit ausgemacht werden.

Unsere hier vorgestellten IR-Detektoren finden aber auch in vielen nicht-militärischen Bereichen Anwendung, so z. B. in der Umwelt- und Klimaüberwachung, in der Materialprüfung oder in der Medizin. Eine Anwendung aus dem letzten Bereich ist die differentielle IR-Thermografie, die zeitliche Änderungen der Thermoregulation des menschlichen Körpers registriert. Temperaturregulationen beim Menschen erfolgen im Hz- und Sub-Hz-Bereich, so bei  $0,1 \text{ Hz}$  für die Va-

somotorik, bei 0,3 Hz bei der Atmung und oberhalb von 1 Hz bei der Herztätigkeit. Der Stoffwechsel und damit die thermische Signatur von pathologischem Gewebe, z. B. Tumoren, unterscheidet sich deutlich von gesundem Gewebe. Voraussetzung für eine zuverlässige Diagnostik ist dabei allerdings neben hoher thermischer Auflösung vor allem eine gute Langzeitstabilität, um diese langsamen Regulationen zu ermitteln. Dies ist mit der von uns entwickelten IR-Kamera erstmals gelungen, diese IR-Thermografie ist in den USA bereits zugelassen. Die Vorteile des Verfahrens liegen in der fehlenden Strahlenbelastung, es kann somit wiederholt und oft angewendet werden, z. B. in der Therapieüberwachung.

Eine Serie von gekoppelten Quantenfilmen ist auch Kernstück eines weiteren „neuen“ optoelektronischen Bauelements, des Quantenkaskadenlasers (QCL = quantum cascade laser). Zwei gebundene Elektronenzustände im Potentialtopf fungieren als oberes und unteres Laserniveau, die Energiedifferenz bestimmt die Emissionswellenlänge. Diese kann auch hier durch „band structure engineering“ in weiten Bereichen variiert werden, so wurden in unterschiedlichen Materialsystemen Wellenlängen von 3 bis über 100  $\mu\text{m}$  realisiert. Eine effektive Besetzungsinversion der an der Emission beteiligten Laserniveaus ist Voraussetzung für die Lasertätigkeit. Der angeregte Zustand sollte daher langlebiger sein, der untere schnell entvölkert werden, also möglichst kurzlebig. Die Wirkungsweise des QCLs wird in Abb. 2 deutlich.

Der Laser arbeitet dann effizient, wenn Elektronen das obere Laserniveau nur über das untere Laserniveau verlassen können, d. h. die Potentialbarriere muss für Elektronen im oberen Niveau undurchlässig sein. Dies erreicht man mit ei-

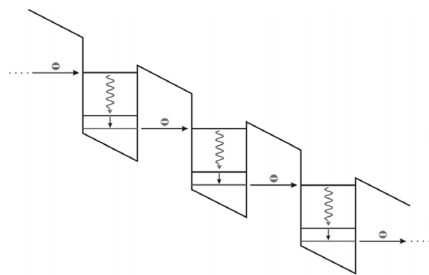


Abb. 2a: Prinzip des QCLs: Übergänge zwischen gebundenen Zuständen im Potentialtopf (Leitungsbandverlauf).

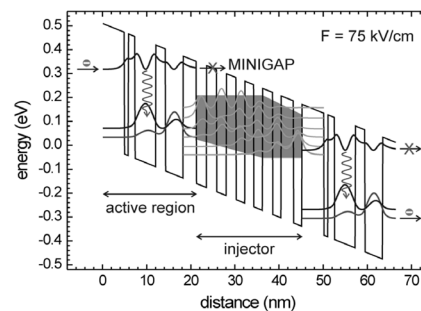


Abb. 2b: Bandstruktur des QCLs mit aktiver Zone und Injektor. Laserübergang im linken Potentialtopf (Lebensdauer des obigen Niveaus  $\sim 2 - 3$  ps), Entleerung des unteren Niveaus durch Tunneln (0,2 ps) und Injektion in nächster Stufe der Kaskade.

nem Übergitter, das die Elektronen im oberen Laserniveau reflektiert. Die Periode dieses „Bragg-Gitters“ wird so eingestellt, dass die reflektierten Teilwellen konstruktiv überlagert sind. Für das untere Niveau gilt das Gegenteil – hier muss die Barriere möglichst durchlässig sein, um das untere Niveau effektiv zu entleeren. Dies geschieht durch einen resonanten Tunnelprozess in einen benachbarten Potentialtopf, wobei die Energiedifferenz gerade der Energie eines LO-Phonons entspricht – dieser resonante Prozess ist schnell. Der Materialgewinn der unipolaren QCLs ist niedriger als der konventioneller bipolarer Laser, für einen ausreichenden Materialgewinn müssen daher viele Perioden kaskadiert werden, d. h. ein Elektron durchläuft viele Quantentöpfe unter Aussendung jeweils eines Photons. Das Übergitter der Barriere muss daher noch eine weitere Funktion erfüllen, es muss als effektiver Injektor für den folgenden Potentialtopf fungieren, oder, anders ausgedrückt, es muss für die getunnelten Elektronen transparent sein (durch die Ausbildung von Minibändern). Die gesamte Struktur ist ferner so auszulegen, dass Energieniveaus und Resonanzbedingung bei angelegtem elektrischen Feld passend bzw. erfüllt sind, was alles noch etwas komplizierter macht [2].

Der QCL ist ein Musterbeispiel für die erfolgreiche Anwendung von Quantenphänomenen in neuen Bauelementen, demonstriert andererseits aber auch sehr eindeutig den hohen Anspruch an Material- und Technologieentwicklung. Es ist deshalb wahrscheinlich kein Wunder, dass mehr als 20 Jahre zwischen erstem Vorschlag des QCLs [3] und erster Realisierung [4] vergingen. Der typische QCL enthält bis zu 1000 Einzelschichten, deren Dicken dürfen in nur atomaren Dimensionen variieren.

Die QCLs sind eine neue Klasse von Lasern, durch die konsequente Ausnutzung von Quanteneffekten werden neue Wellenlängenbereiche erschlossen mit Emissionen bis über 100  $\mu\text{m}$ . Im übrigen sind sie die derzeit einzigen Halbleiterlaser, die im mittleren IR bei Raumtemperatur betrieben werden können. Sie werden Anwendungen finden in zivilen und militärischen Feldern, so z. B. in der spektroskopischen Spurengasanalyse [2], da die Schwingungs-Rotationsübergänge vieler relevanter Gasmoleküle im mittleren IR liegen. In der medizinischen Diagnostik und Therapie und vielleicht in der Freistrahlkommunikation liegen weitere Anwendungsgebiete.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Nur wenige Bereiche unserer technisierten Welt haben sich so rasant und nachhaltig verändert wie die Mikroelektronik oder Optoelektronik. Konsequente Skalierung und Erhöhung der Integrationsgrade kennzeichnen die Silicium-CMOS-Technik. Mit Heterostrukturen und reduzierter Dimensionalität der Ladungsträger sind neue Bauelemente entstanden wie QWIPs und QCLs. Auf dem Sektor der Materialforschung hat sich ein neuer III-V-Halbleiter etabliert,

das GaN, Grundlage für kurzwellige (blaue) LEDs und Laser. Hier wird einer der großen Zukunftsmärkte der Halbleiter liegen auf dem Gebiet der Lichterzeugung mit Festkörpern: Solid-state lighting oder „Leuchtdioden werden Glühlampen ersetzen“.

### Literatur

- [1] SCHNEIDER, H., M. WALTHER, C. SCHÖNBEIN, R. REHM, J. FLEISSNER, W. PLETSCHEN, J. BRAUNSTEIN, P. KOIDL, G. WEIMANN, J. ZIEGLER & W. CABANSKI: QWIP FPAs for high-performance thermal imaging. *Physica E* **7**, 101 (2000).
- [2] MANN, C.: Entwurf und Charakterisierung von Quantenkaskadenlasern. Dissertation, Univ. Freiburg, ISBN 3-89820-758-7, (2004).
- [3] KAZARINOV, R. F. & R. F. SURIS: Electric and electromagnetic properties of semiconductors with a superlattice. *Sov. Phys. Semicond.* **6** (1), 120 – 131 (1972).
- [4] FAIST, J., F. CAPASSO, D. L. SIVCO, C. SIRTORI, F. A. HUTCHINSON & F. CHO: Quantum cascade laser. *Science* **264**, 533 – 556 (1994).

## **FESTVERSAMMLUNG IM ALTSTADTRATHAUS**

Prof. Dr.rer.nat. Dr. h.c. JOACHIM KLEIN  
Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

### **Begrüßung**

Meine sehr verehrten Damen und Herren,  
verehrte Gäste und  
hohe Festversammlung,

die Wechselbeziehungen von Wissenschaft und Gesellschaft zu pflegen und zu intensivieren gehört zu den vorrangigen Aufgaben der Wissenschaftlichen Akademien und Wissenschaftlichen Gesellschaften.

Dies geht auch aus der knappen Formulierung in § 1 unserer gegenwärtigen Satzung hervor: „Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft hat durch eigene Tätigkeit und im Zusammenwirken mit anderen Gesellschaften der Wissenschaft zu dienen“.

Wie könnte nun die Gesellschaft, in der wir leben und arbeiten, besser repräsentiert sein als durch den Ministerpräsidenten unseres Landes? Und so ist es mir eine besondere Freude und Ehre, Sie, verehrter Herr Ministerpräsident, in unserer Mitte begrüßen zu können.

Bereits im vergangenen Jahr haben Sie die Absicht geäußert, unsere Festversammlung zu besuchen – der enge Zeitplan sprach dann dagegen. Damit fühlte ich mich aber motiviert, Sie rechtzeitig zur diesjährigen Jahresversammlung einzuladen – und prompt kam Ihre Zusage zur Teilnahme und zu einem Grußwort. Dafür danke ich Ihnen, auch im Namen aller Anwesenden, sehr herzlich, zumal es das erste Mal in der Geschichte unserer Gesellschaft ist, dass wir einen so hohen Gast begrüßen dürfen.

In einer weiteren Ebene wird die Gesellschaft durch die gewählten Amtsträger der Städte repräsentiert. So freue ich mich besonders, mit Ihnen, Herr Oberbürgermeister Dr. Hoffmann, den 1. Vertreter der Stadt Braunschweig – die auch Sitz unserer Gesellschaft ist – in unserer Mitte begrüßen zu können. Ich kann damit auch den herzlich Dank dafür verbinden, dass wir wiederum in diesen schönen Räumen Gast der Stadt sein dürfen – und dass Sie im Anschluss an diese Festsitzung zu einem Empfang der Stadt einladen.

Auch Sie, verehrte Frau Harlfinger, sind uns als Bürgermeisterin herzlich willkommen.

Braunschweig in der Region ist ein Markenzeichen vieler aktueller und gemeinsamer Aktivitäten. So freue ich mich besonders, dass mit Herrn Oberbürgermeister Schnellecke aus Wolfsburg und Herrn Bürgermeister Eisermann aus Helmstedt die kommunale Ebene der Region so hochrangig vertreten ist.

Im demokratischen Verständnis stellt allerdings nicht die Exekutive, sondern die Legislative primär die Repräsentanz der Gesellschaft sicher. Frau Dr. Reimann, MdB, die Herren Lehmann und Schrader als Mitglieder des Landtages und Herr Winter als Vorsitzender der Ratsfraktion der SPD in Braunschweig stellen durch ihre Anwesenheit die Brücke zu unseren Parlamenten her. Ich darf Sie herzlich begrüßen.

Dem Kreis der wissenschaftlichen Akademien fühlen wir uns – auch ohne Mitgliedschaft in der Union – kollegial verbunden. So freue ich mich natürlich über die große Resonanz, die unsere Einladung in diesem Kreis gefunden hat:

Ich begrüße die Herren Professoren

- Nöth, Präsident der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München
- Haustein, Präsident der Sächsischen Akademie der Wissenschaften, Leipzig
- Dosch in Vertretung der Heidelberger Akademie der Wissenschaften
- Hesse, Vizepräsident der Mainzer Akademie für Wissenschaften und Literatur
- Wagner, Geschäftsführender Sekretär der Göttinger Akademie der Wissenschaften
- Köhler, Präsident der Akademie für gemeinnützige Wissenschaften, Erfurt
- Pawlik, Präsident der Joachim Jungius-Gesellschaft, Hamburg.

Vielen Dank, dass Sie die weite Anreise auf sich genommen haben und uns damit auch ihre Verbundenheit bezeugen.

Mit unseren Mitgliedern sind wir vorrangig in den technisch orientierten wissenschaftlichen Hochschulen in Hannover, Clausthal-Zellerfeld, Braunschweig zu Hause; wir bieten damit auch eine besondere außeruniversitäre Plattform zur wissenschaftlichen Vernetzung der Universitäten, die sich im „Consortium Technicum“ verbunden haben. Als deren Repräsentanten begrüße ich herzlich die Präsidenten Hesselbach, Braunschweig, Schätzl, Hannover, und den Vizepräsidenten Beck, Clausthal.

Dass unsere Region besonders reich an außeruniversitären Forschungseinrichtungen ist, wird immer wieder als Standortvorteil hervorgehoben. Der Verbund der „ForschungsRegion Braunschweig“ soll dieses Kapital mobilisieren, z. B. bei der Bewerbung um den Titel „Stadt der Wissenschaft“.

Als Vertreter dieser Institutionen heiße ich herzlich willkommen die Herren Backhaus, Präsident der Biologischen Bundesanstalt, Göbel, Präsident der Physi-



kalisch-Technischen Bundesanstalt, Thomas, Geschäftsführer des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Braunschweig, Kierdorf, Ärztlicher Direktor des Städtischen Klinikums, Biegel, Direktor des Braunschweigischen Landesmuseums, Hopf, Präsident der Gesellschaft deutscher Chemiker.

Die Wechselbeziehungen von Wissenschaft und Wirtschaft tragen zur Entwicklung unserer Gesellschaft in besonderer Weise bei. Ich freue mich daher, die Herren Dr. Nöhle, Vorstandsvorsitzender Nordzucker AG, Salewski, Sprecher der Siemens AG Braunschweig, Dr. Lehmann-Grube, Vorstandsvorsitzender der BS-Energy, Horenburg, Aufsichtsratsvorsitzender der Wolters AG, Dr. Meier, Hauptgeschäftsführer der IHK, und Jahn, Vorstand der Volksbank Braunschweig, in unserer Mitte begrüßen zu können.

Die Medien wie Presse und Rundfunk sind wichtige Vermittler für unsere Arbeit an die Öffentlichkeit. Ich freue mich, dass aus diesem Kreis die Herren Raue als Chefredakteur der Braunschweiger Zeitung und Röhrig als Studioleiter des Norddeutschen Rundfunks Braunschweig zu uns gekommen sind.

Mit der Bitte um Verständnis, dass ich im Weiteren auf die namentliche persönliche Begrüßung verzichte, möchte ich die Vertreter der Gerichte, Behörden und Verwaltung herzlich begrüßen.

Weiterhin entspricht es einer guten Tradition, dass viele Angehörige der Hochschulen und wissenschaftlichen Institute unserer Region unserer Einladung gefolgt sind.

Und abschließend heiße ich auch die Mitglieder unserer Gesellschaft mit ihrer Begleitung ebenso herzlich willkommen wie die Witwen unserer verstorbenen Mitglieder.

Wenn ich nun doch abschließend zur persönlichen Begrüßung zurückkehre, so gilt diese unserem zweiten Ehrengast: dem Träger der Carl Friedrich Gauß-Medaille 2005, Herrn Professor Dr. Klaus von Klitzing.

Sehr früh in Ihrer wissenschaftlichen Laufbahn wurden Sie im Jahr 1985 mit dem Nobelpreis geehrt. Wir sind überzeugt, dass die daran anschließende mehr als zwanzigjährige überaus erfolgreiche wissenschaftliche Arbeit am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart einer eigenen Auszeichnung wert und dafür die Verknüpfung mit dem Namen und Wirken von Carl Friedrich Gauß mehr als geeignet ist. Seien Sie, lieber Herr von Klitzing, mit Ihrer Frau Gemahlin in unserer Mitte herzlich willkommen!

Mit Ihnen allen, meine sehr verehrten Damen und Herren, freue ich mich auf eine anregende und interessante Festveranstaltung, wobei das nun folgende Grußwort unseres Herrn Ministerpräsidenten einen ersten Höhepunkt darstellt.

## Bericht

### Nachrufe

Am Anfang meines Berichtes habe ich die traurige Pflicht, der verstorbenen Mitglieder zu gedenken.

Es verstarben im Berichtsjahr:

- 06.05.2004    Wilhelm Batel, Dr.-Ing., Prof. u. Dir. für Verfahrenstechnik, FAL Braunschweig. Ordentliches Mitglied der Klasse für Ingenieurwissenschaften seit 1977
- 11.08.2004    Franz Haslinger, Dr.jur. Dr.rer.pol., Prof. für Volkswirtschaftslehre an der Universität Hannover. Ordentliches Mitglied der Klasse für Geisteswissenschaften seit April 2004
- 04.09.2004    Hans-Heinrich Mohr, Dr.rer.pol., Versicherungswissenschaften, Braunschweig. Ordentliches Mitglied der Klasse für Geisteswissenschaften seit 1975
- 04.11.2004    Josef Fleckenstein, Dr.phil., Prof.em. für Mittelalterliche Geschichte, Direktor Max-Planck-Gesellschaft für Geschichte, Göttingen. Korrespondierendes Mitglied der Klasse für Geisteswissenschaften seit 1996. Gauß-Preisträger 1994
- 03.12.2004    Johannes-Werner Partenscky, Dr.-Ing., Dr.phys. Prof. h.c. Dr.h.c., Prof.em. für Verkehrswasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover. Ordentliches Mitglied der Klasse für Bauwissenschaften bzw. Ingenieurwissenschaften seit 1981
- 24.01.2005    Günter Neumann, Dr.phil., Prof.em. für Sprachwissenschaften, Universität Würzburg. Korrespondierendes Mitglied der Klasse für Geisteswissenschaften seit 1988
- 17.03.2005    László Fejes Tóth, Dr., Prof. u. Direktor des Mathematischen Forschungsinstituts der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest. Korrespondierendes Mitglied der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften seit 1977. Gauß-Preisträger 1977.
- 24.04.2005    Karl Popp, Dr.-Ing.habil. Prof. E.h., Prof. für Mechanik, Universität Hannover. Ordentliches Mitglied der Klasse für Ingenieurwissenschaften seit 1998

Die Verstorbenen haben, jeder in seiner wissenschaftlich und persönlich prägenden Art, zur erfolgreichen Arbeit unserer Gesellschaft und ihrer wissenschaftlichen Repräsentanz beigetragen. In Dankbarkeit werden wir ihnen ein ehrendes Gedenken bewahren.

Sie haben sich zu Ehren der Verstorbenen von Ihren Plätzen erhoben – ich danke Ihnen.

### **Zuwahlen und personeller Stand der BWG**

Durch Zuwahlen im Plenum konnten wir unseren Mitgliederkreis auf Vorschlag der jeweiligen Klassen wie folgt ergänzen:

#### **Klasse für Ingenieurwissenschaften**

zum ordentlichen Mitglied in der Wahlsitzung vom **10.12.2004**

- Prof. Dr.-Ing. Otto **Carlowitz**,  
Professor für Umweltwissenschaften an der TU Clausthal, Geschäftsführer  
des CUTEK-Instituts Clausthal

zum korrespondierenden Mitglied

- Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c.mult. Dr.-Ing.E.h. **Joachim Milberg**  
Professor für Maschinenbau und Produktionswissenschaften, Präsident des  
acatech – Konvent der Technikwissenschaften an der Union der deutschen  
Akademien, Gaußpreisträger 2004

#### **Klasse für Geisteswissenschaften**

zum ordentlichen Mitglied in der Wahlsitzung vom **10.12.2004**

- Prof. Dr.phil. Klaus **Conermann**  
Professor em. für Germanistik (neuere deutsche Literatur); Projektleiter  
und Herausgeber: Die deutsche Akademie des 17. Jahrhunderts. Im Auf-  
trag der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, an der  
Herzog August Bibliothek Wolfenbüttel

Damit gehörten der BWG am 30.04.2005 an: 141 ordentliche Mitglieder sowie 73 korrespondierende Mitglieder.

### **Interne Veranstaltungen**

Die reguläre Arbeit findet ihren Niederschlag in den Plenarversammlungen und Klassensitzungen. Die Titel und Texte der Beiträge sind im Jahrbuch dokumentiert.

Die Sitzungen finden überwiegend in Braunschweig, aber mindestens einmal jährlich auch in den Partnerstädten Hannover und Clausthal-Zellerfeld statt.

### **Veranstaltungen in der Öffentlichkeit**

In weiteren Veranstaltungen stellen wir, in der Regel gemeinsam mit Partnern, in öffentlichen Veranstaltungen wichtige Themen zur Diskussion:

Am 29.11.04 veranstaltete unsere klassenübergreifende Kommission „Recht und Technik“ gemeinsam mit Experten der E.ON-Kraftwerke GmbH ein Symposium zum Thema „Regulierung der Stromversorgung“. Dabei wurden Fragen der Versorgungsqualität und Versorgungssicherheit aus ökonomischer und technischer Sicht für Privat- und Industrieverbrauch diskutiert.

Am 6.12.04 beteiligte sich die BWG wie in jedem Jahr mit einem wissenschaftlichen Vortrag an der „Verleihung des Bürgerpreises für herausragende studentische Leistungen“.

Am 2.2.05 fand, gemeinsam veranstaltet mit dem Evangelischen Klosterforum, Braunschweig, und der Akademie für Ethik in der Medizin, Göttingen, ein weiteres Symposium zum Generalthema der Stammzell-Forschung statt. Dieses Mal lautete der Titel „Therapeutisches Klonen – ethisch verantwortbar oder nicht?“

Die immer wieder aufflackernde Diskussion, aktuell belegt durch die unsägliche „Chimären-Diskussion“ oder die jüngst aus Korea berichteten Klonerfolge, zeigt den Informationsbedarf bei diesem wichtigen Zukunftsthema auf, dem wir auch weiterhin entgegen kommen wollen.

Dass wir uns am Braunschweiger Gauß-Jahr in angemessener Weise beteiligen, ist für uns selbstverständlich. Ein wichtiger Beitrag war das heutige Vormittags-symposium zum Thema „Aktuelle Festkörperphysik – Quanteneffekte in Halbleitern“.

Den Kollegen Göbel und Kowalsky als Organisatoren, Landwehr, Haug, Morgenstern, Weimann als Vortragende sowie Welling als Moderator und Diskussionsleiter gilt mein herzlicher Dank.

Als Blick in die Zukunft sei auf ein Symposium verwiesen, das die BWG gemeinsam mit der acatech am 9. November in Braunschweig mit dem Titel „150 Jahre nach Carl Friedrich Gauß – sein Wirken für die Technik von heute“ veranstalten wird.

### Veröffentlichungen

Durch die Vorlage von Publikationen kommen wir unserer Verpflichtung nach, die Ergebnisse unserer Arbeit der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Aktuell erschienen sind

das Jahrbuch 2004 der BWG und

Band 54 der Abhandlungen der BWG.

Frau Jäcker vom Cramer-Verlag danken wir wiederum für die sorgfältige und zeitgerechte Fertigstellung.

Meine Damen und Herren:

Unsere diesjährige festliche Jahresversammlung ist nicht eine unter vielen anderen, sondern sie hebt sich – wie schon erwähnt – aus der Normalität dadurch hervor, dass wir uns in einem Jahr der Erinnerung an Carl Friedrich Gauß befinden. Sein Leben, das am 30. April 1777 in Braunschweig begann, und das im wissenschaftlichen Bereich durch einen außerordentlich hohen Ertrag, im privaten Bereich durch alle Höhen und Tiefen menschlicher Erfahrung gekennzeichnet war, fand am 23. Februar 1855 in Göttingen sein Ende. In Braunschweig und Göttingen wird daher in vielfältiger Weise dieses großen Sohnes und Bürgers mit Blick auf die 150. Wiederkehr des Todestages gedacht.

Unsere heutigen Veranstaltungen – das Carl Friedrich Gauß-Kolloquium des Vormittags sowie die Festversammlung als Rahmen für die Verleihung der Gauß-Medaille – sind wichtige Elemente eines Braunschweiger Jahresprogramms, dessen Gesamtkonzeption und Gestaltung ganz wesentlich vom Braunschweigischen Landesmuseum und – um präziser zu sein – dessen unermüdlichen Direktor Gerd Biegel geprägt ist.

Angesichts der Tatsache, dass die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft mit der seit 1949 verliehenen Gauß-Medaille einen zentralen und nachhaltigen Beitrag zur Vergegenwärtigung des Geburtsortes im Bewusstsein der wissenschaftlichen Welt leistet, war es selbstverständlich, dass die Präsentation der „Geschichte der Gauß-Medaille“ ein wichtiger Bestandteil der Ausstellung „Bildungsreform und Elitförderung“ im Braunschweigischen Landesmuseum ist. Da man aber die Geschichte der Gauß-Medaille nicht losgelöst von der Geschichte der sie verleihenden Institution verstehen kann, wurde auch die Geschichte der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft selbst zu einem integralen Element dieser wissenschafts-historischen Ausstellung.

Der Blick auf das Gründungsjahr 1943 unserer Gesellschaft macht sofort deutlich, dass wir mit einem Problem der geistigen und personellen Legitimation im

Übergang von einer nationalsozialistischen Universitätsstruktur zum demokratischen Neuanfang der Nachkriegszeit konfrontiert sein könnten.

Eine schnelle, pragmatisch beruhigende Antwort ergibt sich gewiss schon daraus, dass die kontinuierliche juristische Existenz und die seit 1946 immer wieder dokumentierte Förderung der BWG durch die jeweiligen staatlichen Organe gar nicht denkbar wäre ohne eine wissenschaftlich integre Gründungsphase 1943 bis 1945 und eine sich dann fortsetzende verantwortungsvolle wissenschaftliche Arbeit. Wie wir es aber in der gegenwärtigen Erinnerungswelle an die Zeit vor 60 Jahren erleben, gibt der kritische Blick auf historische Dokumente und handelnde Personen eine stabilere Beurteilungsbasis.

Eine nicht sehr umfängliche, aber doch informative „Aktenlage“ aus der Zeit seit 1943 ist gegeben: Ihr lässt sich entnehmen, dass der entscheidende Motor der Neugründung eine Gruppe von Wissenschaftlern war, deren Interesse wissenschaftlichen, interdisziplinär orientierten Fragen an der TU Braunschweig galt. Die von dem seinerzeit zuständigen Reichsminister für Wissenschaft, Erziehung und Volksbildung genehmigte Satzung, die zur Gründung am 9. Dezember 1943 führte, darf durchaus als ideologiefrei bezeichnet werden. So heißt es z. B. im § 1 der Satzung: „Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft hat die Aufgabe, die wissenschaftliche Arbeit im Braunschweiger Hochschulraum anzuregen und zu fördern. Insbesondere soll sie über die fachlichen Grenzen hinaus die Bearbeitung von Gemeinschaftsaufgaben übernehmen und dazu beitragen, innere Beziehungen zwischen allen Wissens- und Lebensgebieten herzustellen. Die wissenschaftliche Arbeit findet ihren Niederschlag in Vorträgen, Berichten, Veröffentlichungen und sonstigen Veranstaltungen. Auf eine dauernde Wechselwirkung zwischen der Gesellschaft und den kulturellen Kräften des Hochschulraumes ist besonders Wert zu legen.“

Tiefere Einblicke in die Denkprozesse der damals handelnden Personen liefern darüber hinaus die Redetexte, welche die von den tragenden Wissenschaftlern genannten Argumente und Ziele für die Gesellschaft wiedergeben: Als beispielhaft möchte ich den Schluss der Rede von Ernst Schmidt zitieren, der ab 1943 bis in die 50er Jahre als Senatspräsident der BWG wirkte: „In Zeiten, wo die Wissenschaft nicht hoch im Kurse steht, und eine solche liegt gerade hinter uns, muß man auf ihre Anwendbarkeit für praktische lebenswichtige Zwecke hinweisen, um die Notwendigkeit ihrer Pflege deutlich zu machen. [...] Für den Diener der Wissenschaft bedarf es eines solchen Beweises der Nützlichkeit nicht, denn er sieht in ihre eine der höchsten Formen der Betätigung des menschlichen Geistes. Sie will nicht um Lohn, Anerkennung oder eines nützlichen Zweckes wegen betrieben sein, sondern allein in Erfüllung unseres inneren Strebens nach Erkenntnis und schöpferischer Betätigung. Sie ist neben Religion und Sittlichkeit, neben bildender Kunst, Musik und Dichtung eine Funktion unseres Geistes, die ihren Wert in sich selbst findet. In diesem Sinne wollen wir die Arbeit der

Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft beginnen – mit einem Wort von Max Planck aus einer Gedächtnisrede von Karl Correns, 'dass die in der Stille geübte hingebende sachliche Arbeit auch für das Gemeinwohl sich auf die Dauer stets wirksamer weist als klangvolle Beteuerungen der Gesinnungstüchtigkeit'."

Natürlich galt es – bei allem Bekenntnis zur „reinen“ Wissenschaft – einen Tribut an den politischen Zeitgeist zu entrichten: In dieser Hinsicht ist die Mitgliedschaft strenger Parteigänger in der BWG selbst sowie die Existenz eines Kuratoriums, das durch nationalsozialistische Prominenz gekennzeichnet war, zu werten.

Es finden sich aber keine Anzeichen, dass damit die Arbeit der BWG gegen den Sinn der Satzung oder gegen Personen in zu verurteilender Weise beeinflusst wurde.

Nach den Wirren des Kriegsendes fand sich die BWG Ende 1945 / Anfang 1946 in einer Situation wieder, welche die beiden letzt genannten Faktoren eliminieren konnte und – nach Genehmigung durch die englische Militärregierung am 21. Juni 1946 – die Wiedereröffnung ermöglichte. Wichtig war:

1. Die Satzung behielt ihren Stand und bewies damit ihre wissenschaftliche Substanz.
2. Wissenschaftler wie Ernst Schmidt blieben in der Verantwortung.

Im Kuratorium finden wir Persönlichkeiten wie die Staatsminister Kubel und Vogt, um nur zwei prominente Vertreter des „Neuen Deutschland“ zu nennen.

Auf dieser Basis konnte die BWG, parallel zum Wiederaufbau des Wissenschaftsbetriebs in der Bundesrepublik, ihre Tätigkeit entfalten, wobei es ihr auch darum zu tun war, sich uneingeschränkt zu verselbständigen und die Organisationsform einer „Akademie der Wissenschaften“ anzustreben. Diese war im Kern durch

- Selbstergänzung und begrenzte Platzzahl der Mitglieder sowie
- durch Gliederung in Fachbereiche/Klassen

bereits vorhanden.

Mit einer 2. Satzung, die am 21. April 1953 vom Niedersächsischen Landesministerium beschlossen wurde, erhielt die BWG

- den Status einer Körperschaft des öffentlichen Rechts
- die Unabhängigkeit von der TU Braunschweig mit der Wahl der Mitglieder aus ganz Niedersachsen
- die Selbständigkeit durch Abschaffung eines staatlichen Kuratoriums.

Damit befand sich die BWG in einer rechtlichen Situation, die bis heute gilt, und der entsprechend sie – mit deutlich technischem Schwerpunkt im Dreieck

Hannover-Clausthal-Braunschweig – ihren wissenschaftlichen Auftrag erfüllt. Zwei weitere Satzungsänderungen 1973 und 1993 hatten weniger wichtige Anpassungen zum Inhalt.

Betrachten wir zum Abschluss dieses historischen Exkurses noch einmal den Wandel der Zeit am Beispiel des jeweiligen § 1 der vier Satzungen. 1943 heißt es – und dies wird 1946 bestätigt:

„Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft hat die Aufgabe, die wissenschaftliche Arbeit im Braunschweiger Hochschulraum anzuregen und zu fördern. Insbesondere soll sie über die fachlichen Grenzen hinaus die Bearbeitung von Gemeinschaftsaufgaben übernehmen und dazu beitragen, innere Beziehungen zwischen allen Wissens- und Lebensgebieten herzustellen. Die wissenschaftliche Arbeit findet ihren Niederschlag in Vorträgen, Berichten, Veröffentlichungen und sonstigen Veranstaltungen. Auf eine dauernde Wechselwirkung zwischen der Gesellschaft und den kulturellen Kräften des Hochschulraumes ist besonders Wert zu legen.“

1953 heißt es:

„Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft ist eine Vereinigung von Gelehrten, deren gemeinsame Arbeitsgrundlage die Ehrfurcht vor dem Leben und der Würde des Menschen ist. Ihre Aufgabe ist es, in eigener Arbeit und im Zusammenwirken mit anderen Gelehrten-Gesellschaften der Wissenschaft zu dienen, indem sie die Natur erforscht und zum Wohle der Menschheit nutzbar macht, wobei sie die Beziehungen zu den Geisteswissenschaften besonders pflegt.“

1973 heißt es:

„Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft hat durch eigene Tätigkeit und im Zusammenwirken mit anderen Gesellschaften der Wissenschaft zu dienen.“

Wie wir dies getan und was wir erreicht haben, war der Inhalt meines Berichts. Und vor uns liegt nun der wissenschaftliche Höhepunkt des heutigen Nachmittags, nämlich die Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille 2005. Ich danke Ihnen, dass Sie, lieber Herr von Klitzing, unserem Wunsch zur Entgegennahme dieser Auszeichnung entsprochen haben und zur Verleihung der Medaille heute nach Braunschweig gekommen sind. Für Sie und Ihre verehrte Frau Gemahlin ist Braunschweig kein „Fremdort“, wichtige Jahre Ihres Lebens haben Sie in dieser Stadt verbracht. Wir hoffen und wünschen, dass Sie diesen besonderen Tag der Rückkehr als Gewinn empfinden und in die Reihe der „unvergesslichen Eindrücke“ aus Braunschweig einordnen. Die wissenschaftliche Begründung zur Verleihung der Medaille haben wir Herrn Göbel übertragen. Ich denke, auch das wird Sie freuen.



Sie, meine verehrten Damen und Herren, dürfen sich aber zunächst auf eine musische Entspannung freuen, zu der ich das Klarinettenquartett unter Leitung von Hanns Wilhelm Goetzke begrüße und gleichzeitig herzlich für den klangvollen Beitrag zur Festlichkeit dieses Tages danke.

Ich danke Ihnen, dass Sie mir zugehört haben.

CHRISTIAN WULFF

Niedersächsischer Ministerpräsident

## Grußwort

Sehr geehrter Herr Professor Klein,  
sehr geehrter Herr Professor von Klitzing,  
meine Damen und Herren, verehrte Gäste!

Ihrer Einladung, Herr Professor Klein, an dieser festlichen Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft teilzunehmen und ein Grußwort an Sie zu richten, bin ich gerne gefolgt. Denn ich kann deutlich machen, welche hohe Bedeutung Wissenschaft für die Entwicklung unseres Landes besitzt und dass die Stadt Braunschweig – oft auch gemeinsam mit der sie umgebenden Region – dabei eine prominente Rolle spielt.

Zur Wissenschaft in Deutschland gehören neben den Hochschulen, den außer-universitären Forschungsinstituten und den Forschungsabteilungen der Industrie auch die Wissenschaftlichen Akademien und Gesellschaften.

In all diesen Bereichen hat die Region Braunschweig viel zu bieten. Ich kann Sie nur ermuntern, diese Potenziale z. B. durch die erneute Teilnahme am Wettbewerb „Stadt der Wissenschaft“ des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft auch als Beweis für die Qualität niedersächsischer Standorte öffentlich deutlich zu machen.

Die aus unterschiedlichen Traditionen geborenen, föderal gewachsenen und verankerten wissenschaftlichen Akademien und Gesellschaften werden auch in Zukunft eine angemessene Rolle in der deutschen Wissenschaftslandschaft spielen, wenn sie sich den Herausforderungen in Gegenwart und Zukunft, in Wissens- und Wissenschaftsvermittlung, aber auch in Beratung von Öffentlichkeit und Politik glaubwürdig stellen.

In Niedersachsen sind wir zu Recht stolz auf die Akademie der Wissenschaften zu Göttingen, die im November 2001 ihren 250. Geburtstag feiern konnte und die national und international hohes Renommee besitzt.

Mit Freude und Interesse blicken wir nun aber auch auf Braunschweig und die Institution, bei der wir heute zu Gast sind und die als Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft seit über 60 Jahren ihren Beitrag zur Repräsentanz und Integration der Wissenschaften in Niedersachsen leistet.

Mir erscheint es dabei wichtig, dass sich die beiden Institutionen in Göttingen und Braunschweig nicht bedrängen, sondern sich aufgrund ihrer inhaltlichen

Schwerpunkte und daraus geprägten universitären Verankerung vielmehr partnerschaftlich in guter Weise ergänzen.

In der Göttinger Akademie der Wissenschaften bilden seit jeher die Geisteswissenschaften und Naturwissenschaften den Schwerpunkt der Arbeit, wie dies auch dem Wissenschaftsprofil der Universität Göttingen entspricht.

Demgegenüber hat sich die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft, ihrem Gründungskonzept entsprechend, neben den Naturwissenschaften schwerpunktmäßig in den Disziplinen der Ingenieurwissenschaften engagiert und dabei im Verlauf ihrer 60-jährigen Entwicklung die Grenzen des alten Landes Braunschweig weit überschritten: Sie ist in ihrer Mitgliederstruktur inzwischen fest im Dreieck der technisch geprägten Universitäten Hannover - Clausthal - Braunschweig verankert.

In den Jahrbüchern und den wissenschaftlichen Publikationen Ihrer Gesellschaft ist zu lesen, wie ertragreich und erfolgreich Ihre Arbeit ist. Dabei sind mir angesichts der aktuellen Probleme unserer Industriegesellschaft besonders die disziplinübergreifenden Beiträge zum Themenkreis Recht und Technik wichtig. Nicht ohne Grund stehen hier Fragen der Energieerzeugung und Energieversorgung und Fragen der Wechselwirkung von Mensch, Technik und Umwelt im Vordergrund. Diese sind nicht nur für unseren Industriestandort und für unsere private Lebensgestaltung, sondern auch international – wie meine China-Reise vor wenigen Tagen gezeigt hat – von herausragender Bedeutung.

Ich kann es nur begrüßen und Sie zu weiteren Schritten auffordern, dass Sie den Dialog der Wissenschaft mit der Öffentlichkeit in den letzten Jahren verstärkt haben: Die Gesellschaft hat Anspruch darauf zu erfahren, was und wie Wissenschaftler denken und welche Bedeutung Ergebnisse der Wissenschaft und der Technik für unsere Zukunft haben können. Ihre Symposien zu den wissenschaftlichen und ethischen Fragen der Stammzellforschung sind dafür ein markantes Beispiel.

Eine weitere herausfordernde Aufgabe für Ihre Gesellschaft könnte in den kommenden Jahren darin bestehen, den Strukturwandel des Universitätsdreiecks Hannover - Clausthal - Braunschweig im wissenschaftlichen Diskurs zu begleiten: Es ist evident, dass die im Consortium Technicum verbundenen Universitäten nicht nur untereinander im Wettbewerb um die Mittel des Landes Niedersachsen stehen. Vielmehr können die Universitäten nur gemeinsam und gemeinsam mit den anderen Hochschulen und Forschungseinrichtungen der Region den Wettbewerb mit anderen Regionen nicht nur in West-, Süd- und Ostdeutschland, sondern vor allem in Europa erfolgreich gestalten. Die „kurzen Wege“ zum universitätsübergreifenden und interdisziplinären Gespräch in der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft könnten gerade im Hinblick auf eventuelle schmerzhaft Entscheidungen hilfreich sein. Denn noch

hat offenbar die Region Braunschweig nicht umfassend realisiert, dass sie in einer Untersuchung der Wissenschaftsstrukturen in der EU zu den stärksten Regionen in Europa gehört. Mit diesen Pfunden müssen Sie, müssen wir wuchern, um unser Land Niedersachsen gemeinsam voran zu bringen und unseren Kindern Perspektiven für die Zukunft zu eröffnen.

Mit der Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille an herausragende Persönlichkeiten der Wissenschaften aus allen Disziplinen hat die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft Wissenschaftsgeschichte geschrieben.

Die Liste beginnt mit dem Pionier der industriellen Chemie Walter Reppe 1949 und findet mit dem Pionier der Quantenphysik Klaus von Klitzing in diesem Jahr 2005 einen weiteren Höhepunkt. Die Liste ist ein „Who is Who“ von Menschen, die das durch persönliche Leistung repräsentieren, was man heute durch Geld an Universitäten schnell hervorzaubern möchte: wissenschaftliche Elite.

„Bildungsreform und Eliteförderung – Carl Friedrich Gauß und Braunschweig“ ist das Motto, welches die Ausstellung im Braunschweigischen Landesmuseum zum Gedenken an den 150. Todestag des größten wissenschaftlichen Sohnes der Stadt Braunschweig prägt. Damit wird in historischer Perspektive deutlich, welche hohe Bedeutung den Aspekten eines zukunftsorientierten Bildungssystems und einer damit verbundenen Bereitschaft zur Förderung begabter, leistungsfähiger und leistungswilliger junger Menschen zukommt. Dies erfordert verantwortungsbewusstes Handeln von Staat und Gesellschaft, von Personen und Institutionen: Dazu können auch Wissenschaftliche Akademien und Gesellschaften ihren Beitrag leisten.

In diesem Sinne gilt mein herzlicher Glückwunsch Ihnen, sehr geehrter Herr von Klitzing, als dem Träger der Gauß-Medaille 2005, und der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft für die gelungene Wahl.

Möge Ihre Arbeit auch in den kommenden Jahren zum Wohle der Wissenschaft in Niedersachsen so erfolgreich verlaufen, wie ich es in diesem Jahr erfahren konnte.

Der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft wünsche ich auch für die kommenden Jahrzehnte alles Gute.

## **Laudatio zur Verleihung der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille an Prof. Dr. Klaus von Klitzing**

Prof. Dr. ERNST O. GÖBEL  
Präsident der PTB,  
Bundesallee 100, D-38116 Braunschweig

Den Nobelpreis, meine Damen und Herren, kann man nicht „toppen“. Er ist ohne Frage die höchste Auszeichnung eines Wissenschaftlers. Klaus von Klitzing hat den Nobelpreis für Physik 1985 für die Entdeckung des Quanten-Hall-Effektes erhalten, im jugendlichen Alter von damals gerade 42 Jahren.

Mit der Verleihung der Gauß-Medaille im Gauß-Jahr 2005 will und wollte die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft sich auch nicht anmaßen, mit dem Nobelpreis in Konkurrenz zu treten. Nein! Vielmehr möchte die BWG damit die großartigen und herausragenden wissenschaftlichen Beiträge würdigen, die Klaus von Klitzing mit seiner Arbeitsgruppe am Stuttgarter Max-Planck-Institut für Festkörperforschung auch nach der Entdeckung des Quanten-Hall-Effektes und der Verleihung des Nobelpreises erarbeitet hat und die ihm international einen, wenn nicht sogar den Spitzenplatz in der modernen Festkörperphysik eingebracht haben – ich werde darauf noch kurz zurückkommen.

Der Quanten-Hall-Effekt steht also gar nicht im Fokus meiner Laudatio und des heutigen Gauß-Kolloquiums, obwohl er über die Jahre nichts von seiner wissenschaftlichen Attraktivität verloren hat. Nach wie vor erscheint etwa eine Veröffentlichung pro Tag zu diesem Thema in den entsprechenden Fachjournalen. Darüber hinaus ist er neben dem Josephson-Effekt (dem Tunnel-Effekt in supraleitenden Strukturen) für die Metrologie von überragender praktischer Bedeutung: Über den Quanten-Hall-Effekt kann die Einheit des elektrischen Widerstandes, das Ohm, auf die „von-Klitzing-Konstante“ – gegeben durch die Planck-Konstante geteilt durch die Elementarladung zum Quadrat – zurückgeführt werden. Nicht nur dadurch, sondern auch aufgrund seines wissenschaftlichen Werdegangs, auf den Herr Kollege Landwehr heute vormittag ja auch schon eingegangen ist, hat Klaus von Klitzing einen engen Bezug zur PTB und deren Aufgaben, und wir sind glücklich, dankbar und stolz, dass er als Mitglied und Vizepräsident unseres Kuratoriums unsere Arbeit mit Rat und Tat begleitet. Ich hatte den wissenschaftlichen Werdegang gerade erwähnt und das bringt mich dazu, Ihnen die Vita von Klaus von Klitzing kurz vorzustellen.

Klaus von Klitzing wurde 1943 in Schroda (Posen) geboren. Der Vater war Oberforstmeister und von ihm hat er wohl auch die Liebe zu Natur und Garten geerbt. Das kam ihm auch später zupass. In der Braunschweiger Zeitung vom 17. Oktober 1985, also unmittelbar nach Bekanntgabe der Entscheidung des Nobelpreis-Komitees, wird Frau Falkenberg, die inzwischen verstorbene Schwiegermutter von Klaus von Klitzing, unter der Überschrift „Sonntags vom Eintracht-Stadion auf ein Bier ins Magniviertel“ wie folgt zitiert: „Mein Schwiegersohn hat uns damals gleich zu Anfang sehr imponiert, weil er, kaum dass er sich uns vorgestellt hatte, meinem Mann gleich beim Erdbeerbeet-Umgraben half“.

Wie man aufgrund des Geburtsortes erahnen kann, war die Kindheit aufgrund äußerer Umstände alles andere als einfach. Die Familie musste nach dem Krieg fliehen und siedelte 1948 nach Oldenburg i. O. über. Dort wurde Klaus von Klitzing auch eingeschult, später besuchte er die Volksschule in Essen i. O. Von 1953 bis 1962 besuchte er das Artland-Gymnasium in Quakenbrück, an dem er 1962 das Abitur ablegte. Danach begann er mit dem Physikstudium an der Technischen Universität in Braunschweig. Während seines Studiums arbeitete er mehrmals als Praktikant, später als Werkstudent, in der PTB, zuletzt im Labor von Herrn Landwehr.

1969 erhielt er sein Diplom in Physik mit einer Arbeit zu „Lebensdauermessungen nach dem Photodecayverfahren in Indiumantimonid“, die am Institut B für Physik der TU Braunschweig unter der Leitung von Prof. Kessler durchgeführt wurde. Danach folgte Klaus von Klitzing Herrn Landwehr, der inzwischen eine Professur am Physikalischen Institut der Universität Würzburg übernommen hatte. 1972 wurde er dort promoviert. Thema der Dissertation war „Galvanomagnetische Eigenschaften an Tellur in starken Magnetfeldern“. Nach einem zwischenzeitlichen einjährigen Forschungsaufenthalt an der Universität Oxford habilitierte er sich 1978 an der Universität Würzburg. Das Thema seines Habilitationsvortrages lautete „Das Internationale Einheitensystem“. Nach der Habilitation war Klaus von Klitzing Heisenberg-Stipendiat der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Er hat den Freiraum, den dieses Stipendium bietet, weidlich genutzt und Anfang des Jahres 1980 (genauer in der Nacht des 4. Februar) während eines Gastaufenthaltes am Hochfeld-Magnetlabor des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung, Stuttgart, und des CNRS in Grenoble, den Quanten-Hall-Effekt in Si MOSFETs entdeckt, wofür er – wie schon gesagt – 1985 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurde. Im Herbst 1980 wurde er auf eine C3-Professur an die TU-München berufen und seit Anfang 1985 ist er Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart.

Mit der Entdeckung des Quanten-Hall-Effektes wurde der nachhaltige und endgültige Beweis erbracht, dass Festkörper und spezielle Halbleiter, was die Grundlagen der Physik angeht, „salonfähig“ geworden waren, ihre Eigenschaften also nicht mehr durch „Dreckeffekte“ bestimmt werden, wie es in den Anfängen der

Festkörperphysik teils verächtlich geäußert wurde, sondern sich mit ihnen grundsätzliche und absolut neue physikalische Fragestellungen studieren lassen, die zudem auch viel unmittelbarer als in vielen anderen Bereichen der Physik zu praktischen Anwendungen führen können. Dass eine der genauesten experimentellen Bestimmungen der Feinstrukturkonstante, die die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung charakterisiert, in einem Festkörper mittels des Quanten-Hall-Effektes geschieht, ist dafür eindrucksvoller Beleg ebenso wie die wissenschaftlichen Ergebnisse, die im heutigen Gauß-Kolloquium präsentiert wurden. Die Entdeckung des Quanten-Hall-Effektes war somit auch der Anstoß für die Entwicklung eines bis heute höchst aktuellen und spannenden Gebiets der Festkörperphysik, die sich mit den elektronischen Eigenschaften niederdimensionaler Elektronensysteme (und deren Anwendung) beschäftigt. Niederdimensional bedeutet, dass die dreidimensionale räumliche Bewegung der ansonsten freien Elektronen in Metallen oder auch Halbleitern eingeschränkt wird auf zwei-, eine- oder null-Dimensionen. Sind die entsprechenden Dimensionen von der Größenordnung der de-Broglie-Wellenlänge (bzw. freien Weglänge) der Elektronen, also im Bereich einiger 10 nm bis 100 nm, werden Quantisierungseffekte wichtig, die u. a. dazu führen, dass die erlaubten Energiezustände nicht mehr kontinuierlich verteilt sind. Dementsprechend spricht man von Quantenfilmen, Quantendrähten und Quantenpunkten, je nachdem, ob freie Bewegung der Elektronen nur noch in zwei- oder einer Dimension oder überhaupt nicht mehr möglich ist.

Über diese niedrigdimensionalen Quantenstrukturen haben wir heute vormittag ja schon Beeindruckendes gehört, und die wissenschaftlichen Arbeiten von Klaus von Klitzing – auch nach der Entdeckung des Quanten-Hall-Effektes – beschäftigen sich mit den grundlegenden, z. T. neuen physikalischen Eigenschaften dieser Systeme. Weitere Ingredienzien seiner Arbeit sind tiefe Temperaturen und sehr oft auch hohe Magnetfelder – tiefe Temperaturen, um häufig störende thermische Effekte aufgrund der Bewegung der Atome (Phononen) oder der Elektronen auszuschalten, und hohe Magnetfelder, weil sich z. B. damit u. a. von außen, über die Magnetfeldstärke, die Dimensionalität des elektronischen Systems verändern lässt (z. B. von 2 D auf 0 D).

Obwohl der Quanten-Hall-Effekt an 2-D-Elektronen in Si MOSFETs entdeckt wurde, zeigte sich alsbald, dass Heterostrukturen, das sind Schichtstrukturen aus III-V-Verbindungshalbleitern – GaAs/AlGaAs ist hier das Modellsystem –, die mit modernen Verfahren der Halbleitertechnologie mit atomar kontrollierter Präzision hergestellt werden konnten, bez. ihrer Qualität und Variabilität den Si MOSFETs überlegen waren und sind und daher auch des Weiteren im Fokus der Arbeiten der Klaus-von-Klitzing-Gruppe standen.

Lassen Sie mich einige der Highlights der Arbeiten von Klaus von Klitzing nennen und kurz kommentieren. Aufgrund der Fülle der herausragenden Arbei-

ten kann das nur ein Schnappschuss sein, zudem noch ein subjektiver. Mit insgesamt inzwischen über 650 Veröffentlichungen in referierten wissenschaftlichen Zeitschriften, davon knapp 600 nach 1985, wird man mir das nachsehen (118 PR, 87 JETP Letters, 59 PRL, 33 APL, 3 Nature). – Sollte ich, lieber Herr von Klitzing, hier Wesentliches übersehen oder vernachlässigt haben, haben Sie ja anschließend noch die Möglichkeit, das gerade zu rücken.

Obwohl der Quanten-Hall-Effekt schon 1985 mit dem Nobelpreis „abgesegnet“ wurde und seit 1990 – als die Meterkonvention beschloss, die Einheit des Elektrischen Widerstands, das Ohm, über den Quanten-Hall-Effekt zu reproduzieren, und dazu den Wert der von-Klitzing-Konstante festlegte – zum Alltagsgeschäft der metrologischen Institute gehört, hat er die Wissenschaftler bis heute weltweit (eine Veröffentlichung pro Tag) beschäftigt. Von besonderem Interesse war dabei auch die Frage nach der Stromverteilung innerhalb der Probe im Bereich des Quanten-Hall-Effektes. Klaus von Klitzing entwickelte mit seinen Mitarbeitern eine besonders elegante, technologisch aber extrem anspruchsvolle Technik, die Strom- oder genauer die Potentialverteilung im 2-DEG auszumessen. Dazu wurden elektronenlithographisch 1-Elektron-Tunnel-Transistoren auf die Hall-Strukturen aufgebracht, die als empfindliche Elektrometer fungierten. Damit konnte nachgewiesen werden, dass an den Kanten der Probe im Bereich des Quanten-Hall-Effektes sich abwechselnd leitende und nicht-leitende Streifen bilden, deren Anzahl mit dem Landau-Niveau-Füll-Faktor konsistent ist.

Ähnlich verblüffendes und unerwartetes Verhalten wie beim Quanten-Hall-Effekt selbst fanden von Klitzing und Mitarbeiter, als sie ein 2 DEG bei tiefen Temperaturen und relativ schwachen Magnetfeldern mit Mikrowellen bestrahlten. Wieder fand man dissipationslose Zustände, also verschwindenden Längswiderstand, diesmal allerdings nicht korreliert mit dem Füllfaktor und auch nicht begleitet von quantisierten Werten des Hall-Widerstandes. Die Experimente legen die Deutung nahe, dass sich auch hier ein neuartiger Elektronenzustand ausbildet, der durch das Auftreten von Energielücken charakterisiert ist – meines Wissens ist die Angelegenheit aber noch nicht abschließend geklärt.

Während sich der ganzzahlige („integer“) Quanten-Hall-Effekt, der „von-Klitzing-Effekt“, um die Elektron-Elektron-Wechselwirkung wenig zu kümmern scheint, wird der gebrochenzahlige („fractional“) Quanten-Hall-Effekt, der wenige Jahre später von Horst Störmer und Daniel Tsui entdeckt, von Bob Laughlin theoretisch beschrieben und 1998 ebenfalls mit dem Nobelpreis gewürdigt wurde, durch die e-e-Wechselwirkung entscheidend bestimmt. Diese komplexe Wechselwirkung lässt sich, was den Quanten-Hall-Effekt betrifft, durch die Einführung eines neuen Quasi-Teilchens, des Composite Fermion, elegant beschreiben.

Composite Fermions sind, wie der Name sagt, zusammengesetzte Teilchen, bestehend aus einem Elektron und einer geraden Anzahl magnetischer Flussquanten,



deren Orientierung dem externen Feld entgegen gerichtet ist. Mit diesen Composite Fermions lässt sich der gebrochenzahlige Quanten-Hall-Effekt auf den ganzzahligen von-Klitzing-Quanten-Hall-Effekt, jetzt aber in einem effektiven Magnetfeld, zurückführen. Klaus von Klitzing und Mitarbeitern – hier sind besonders Smet und Kukushkin zu erwähnen – gelang nicht nur erstmals der direkte Nachweis der Composite Fermions über die Cyclotron Resonance, sondern sie konnten auch aufzeigen, dass der Quanten-Phasenübergang von einem unpolarisierten in einen vollständig spin-polarisierten, fraktionierten Quanten-Hall-Zustand Eigenschaften eines Ising-Ferromagneten zeigt und über die Hyperfein-Wechselwirkung signifikant mit dem Kernspin koppelt. Da diese Wechselwirkung von der Elektronendichte abhängt, lässt sie sich in einer FET-Struktur durch eine externe Gate-Spannung „steuern“, was eine neue spektroskopische Möglichkeit zum Studium der kollektiven, niederenergetischen Anregungen im Elektronensystem eröffnet und möglicherweise auch für die Datenspeicherung interessant werden könnte. Allerdings wurde auch schon in früheren Arbeiten der Gruppe von Klaus von Klitzing das Konzept der Composite Fermions indirekt bestätigt, so z. B. durch „Löcher bohren!“ – d. h. durch die Herstellung und Untersuchung des longitudinalen und Hall-Magnetowiderstandes in periodischen und statistisch verteilten „Antidot“-Gittern in einem hochbeweglichen 2-D-Elektronengas: „Antidots“ sind in der Tat Löcher im 2-DEG mit Durchmesser im Bereich einiger 10 nm bis 100 nm, die durch reaktives Ionenätzen eingebracht werden und als Streuzentren wirken.

Neben den Magneto-Transport-Phänomenen in hochbeweglichen 2-D-Elektronensystemen hat sich Klaus von Klitzing mit seiner Arbeitsgruppe zunehmend dem Studium der elektronischen Eigenschaften in 1-D-Quantendrähten und 0-D-Quantenpunkten gewidmet. Es muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die physikalischen Untersuchungen an derartigen Quantenstrukturen im allgemeinen eine äußerst anspruchsvolle Technologie mit Strukturierungsmöglichkeiten im Bereich atomarer Dimensionen erfordern. Nanotechnologie, um einmal das Modewort zu benutzen, gehört in diesem Umfeld zum Alltagsgeschäft.

Um Sie nicht noch weiter mit physikalischen Details zu traktieren, möchte ich hier nur ein oder zwei Arbeiten schlagwortartig nennen: z. B. die Studien von Kondo-Resonanzen in Quantenpunkten (Split-Gates), die aufzeigten, dass eine 1:1-Übertragung des so genannten Anderson-Modells zur Beschreibung der Kondo-Resonanzen in Quantenpunkten nicht in Einklang mit den experimentellen Resultaten steht, obwohl dies in früheren Experimenten anderer Autoren angeblich mehrfach bestätigt wurde. Ich erwähne dieses Beispiel, weil es nach meiner Einschätzung etwas Grundsätzliches in der Art der wissenschaftlichen Arbeit von Klaus von Klitzing belegt, was auch schon bei der Entdeckung des Quanten-Hall-Effektes von Bedeutung war, nämlich die Antworten der Natur auf Fragen, die der Physiker mit seinen Experimenten an sie stellt, ernst zu nehmen, auch wenn sie noch so unerwartet sind.

Quantenpunkte sind wunderbare Spielzeuge der Festkörperphysiker, mit denen sich im Prinzip das Periodensystem der Elemente nachbauen lässt, – daher die Bezeichnung „künstliche Atome“, („artificial atoms“). Wenn Quantenpunkte künstliche Atome sind, so dachte sich Klaus von Klitzing, müsste man doch auch „künstliche Moleküle“ machen können, indem man die Quantenpunkte so arrangiert, dass deren elektronische Wellenfunktionen sich gegenseitig spüren und koppeln, und – ich hätte es sonst nicht erwähnt – es gelang ihm über die Messung der elektrischen Leitfähigkeit der Nachweis des kohärenten elektronischen Transports durch so gekoppelte Quantenpunkte, Quantenmoleküle.

„Klingt alles recht akademisch“, werden Sie vielleicht sagen. Stimmt – Klaus von Klitzing hat sich der Grundlagenforschung verschrieben und sich nie verbogen, indem er Versprechungen machte, dass morgen oder übermorgen daraus ein neues Produkt, Bauelement, Computer oder was auch immer entsteht. Dennoch gilt das, was in der Würdigung der BWG steht, nämlich dass „seine Arbeiten auch die physikalischen Grundlagen für moderne elektronische und optoelektronische Bauelemente legen, wie sie z. B. in Halbleiterlasern (CD, DVD) und extrem schnellen und rauscharmen elektronischen Verstärkern (Handy, Satellitenantennen) bereits in Gebrauch sind“, uneingeschränkt. Herr Weimann hat dies im Symposium heute vormittag mit seinem Vortrag „Mit Quanteneffekten zu neuen Halbleiterbauelementen“ eindrucksvoll belegt. Grundlagenforschung kann und darf aber nicht unter dem Zwang stehen, absehbar Verwertbares zu erarbeiten. Sie hat ihre Rechtfertigung an sich. Dafür hat Klaus von Klitzing permanent geworben und hat es durch seine erfolgreiche wissenschaftliche Arbeit beispielhaft belegt.

Eine Würdigung von Klaus von Klitzing bliebe unvollständig, wenn nicht auch seine „Mannschaft“, also seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter erwähnt würden. Bei allem Respekt vor der wissenschaftlichen Leistung von Klaus von Klitzing – es braucht auch einen qualifizierten und motivierten Mitarbeiterstab, und es ist ein herausragendes Charakteristikum von Klaus von Klitzing, dass er seine Begeisterung für seine Physik nicht nur auf seine meist jungen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sondern auf jeden, der sich für Physik interessiert, übertragen kann.

Die BWG ist stolz auf den Träger der Gauß-Medaille des Gauß-Jahres 2005; mit dem kleinen Schönheitsfehler, dass der Träger zuvor schon den Nobelpreis erhalten hat, können wir gut leben. Wir wünschen Ihnen, lieber Herr von Klitzing, noch viele Jahre erfolgreichen wissenschaftlichen Arbeitens und Ihnen und uns, dass die Gauß-Medaille Ihre Verbindungen – und die Ihrer Gemahlin – zu Braunschweig auffrischt und intensiviert.

Wir freuen uns auf Ihren Vortrag.

# DIE BRAUNSCHWEIGISCHE WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT

VERLEIHT DIE

CARL FRIEDRICH GAUSS-MEDAILLE

HERRN

PROF. DR. RER. NAT. DR. H. C. MULT.  
KLAUS VON KLITZING

STUTTGART

IN WÜRDIGUNG SEINER WEGWEISENDEN BEITRÄGE ZUM VERSTÄNDNIS DER  
ELEMENTAREN ELEKTRONISCHEN PROZESSE UND WECHSELWIRKUNGEN IN  
NIEDRIGDIMENSIONALEN ELEKTRONENSYSTEMEN IN HALBLEITERN. DIESE NEUEN  
ERKENNTNISSE HABEN NICHT NUR DIE KLASSISCHE FESTKÖRPERPHYSIK  
WESENTLICH ERWEITERT, SONDERN AUCH DIE PHYSIKALISCHEN GRUNDLAGEN  
FÜR NEUE ELEKTRONISCHE UND OPTOELEKTRONISCHE BAUELEMENTE GELEGT.

Braunschweig, den 30. April 2005



Präsident  
der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft

**von Klitzing**, Klaus, Prof. Dr., Max-Planck-Inst. für Festkörperforschung,  
Heisenbergstr. 1, 70569 Stuttgart

1943, 28.06. geboren in Schroda

Studium der Physik an der TU Braunschweig

1972 Prom. an der Universität Würzburg

1978 Habilitation an der Universität Würzburg

1980-1984 Prof. an der TU München

1985 Honorarprof. an der Universität Stuttgart

seit 1985 Direktor und Wiss. Mitglied am Max-Planck-Inst. für Festkörperforschung

1985 Nobelpreis für Physik

Bezeichnung der Fundamentalkonstanten  $h/e^2$  als von-Klitzing-Konstante

Ehrenmitglied der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Zahlreiche Ehrendoktorgrade

Forschungsschlüsselworte (Auswahl): Experimentelle Halbleiterphysik, niedrigdimensionale Elektronensysteme, Nanoelektronik, molekulare Quantenstrukturen

## Schlußworte des Generalsekretärs

Das Denken, meine sehr verehrten Damen und Herren, – und wir alle haben so oder so diese Erfahrung gemacht –, hält gelegentlich auf seinem Weg inne, sieht sich um und zurück und gibt sich Rechenschaft darüber, wie es und alles zugegangen ist. Seit den Anfängen der Wissenschaft gehört zu ihr diese Besinnung auf die Methode, *hê methodos*, eigentlich die Besinnung auf die rechte Weise, die Regel, den Weg zum jeweiligen Ziel zu finden und zu gehen. Als Jean Paul 1804 im Rückblick auf seine großen Welt-Gemälde „Unsichtbare Loge“, „Hesperus“ und „Titan“ die „Vorschule der Ästhetik“ verfaßte, einen Methoden-traktat über die Kunst des produktiven Schreibens, entstand gewiß ein Kanon von Regeln, eine Disziplin, aber der Verstand war hier einmütig tätig mit der Urteilskraft als mit dem Vermögen, die Regeln nicht nur anzuwenden, sondern sie, wo immer es der Erfindung dient, zu ändern. So schließt der § 74 der „Vorschule“ – die Schule selbst sind die Werke – mit einem ‚letzten Wink‘, den Jean Paul den ‚vielleicht bedeutendsten‘ nennt und der allerdings mehr ist als die Ironie dessen, der pro domo sprechen darf: „Freunde, habt nur vorzüglich [...] Genie, dann werdet ihr euch wundern, wie weit ihrs treibt!“

Der heutige Nachmittag hat den weiten Bogen gespannt zwischen dem Grußwort hoher Politik und dem Einblick in die Tiefe der Natur. Das Tertium comparationis ist keineswegs nur die Pragmatik des Festakts: Wir sind daran erinnert, daß die Wissenschaft vor zweieinhalbtausend Jahren nicht aus einem Zufall, gleichsam einer Laune der Natur oder Kultur entsprang, und auch nicht aus einem ökonomischen Bedürfnis, sondern aus dem politischen Denken, aus der Sorge um die *Polis*, um einen Staat, der zum erstenmal in der Geschichte der Menschheit eine Gemeinschaft freier Bürger war. Das Tertium comparationis von Politik und Wissenschaft – und das ist eine europäische Erbschaft, die freilich immer gefährdet war und so auch heute gefährdet ist – heißt: Freiheit, und der geschichtliche Rückblick lehrt, was Freiheit diesseits der Hirn-Gespinnste ihrer derzeitigen Verächter immer gemeint hat: autonom sich verwirklichende Produktivität – Kreativität.

Der Wissenschaftler, den wir heute geehrt haben, bezeugt mit der innovativen Kraft seiner Forschungen stellvertretend für die Wissenschaft überhaupt Jean Pauls Einsicht, daß die Entdeckung, die Innovation ihren Ort weniger in der Schwärze der Buchstaben des Kanons hat als vielmehr im weißen Spiel-Raum zwischen den Zeilen und den Buchstaben selbst – in der Freiheit zwischen ihnen. Die Vorstellung, man könne den Informationsgehalt einer Seite Wissenschaft im Sinn eines „Synergieeffekts“ dadurch sprunghaft vermehren, daß man die unnützen leeren Räume zwischen den Buchstaben und Zeilen tilgt, würde zuletzt nur dazu führen, daß wir in der Tat schwarz zu sehen hätten – daß die

Wissenschaft die Spiel-Räume einbüßte, die sie vom bloßen Wissenschaftsbetrieb unterscheidet. Denn wie Autonomie die Mutter der Produktion, ist Heteronomie die Matrix der Reproduktion.

Ein Tag wie der heutige freilich gibt Anlaß zur Hoffnung, daß es dahin nicht kommen wird, daß der Kanon der Wissenschaft auch in Zukunft nicht schwarz in schwarz, sondern schwarz auf weiß gedruckt wird – und daß wir uns in *diesem* Sinn noch mit Jean Paul wundern können, ‘wie weit wirs treiben’. Lassen Sie mich darum in eben diesem Sinn zum Schluß unsrer feierlichen Jahresversammlung denen danken, die uns heute im wissenschaftlichen Kanon und zwischen seinen Zeilen lesen ließen, Professor Ernst Otto Göbel aus Braunschweig für die Laudatio, den Professoren Rolf Haug aus Hannover, Gottfried Landwehr aus Würzburg, Markus Morgenstern aus Aachen, Günter Weimann aus Freiburg und Herbert Welling aus Hannover für die Gestaltung des Carl Friedrich Gauß-Kolloquiums, und insbesondere dem diesjährigen Träger der Carl Friedrich Gauß-Medaille, Professor Klaus von Klitzing.

Die Vorschule der Vorschule der Kreativität – auch das hatten die Griechen entdeckt und erprobt und mit dem Namen *Symposion* getauft – ist der Spiel-Raum zwangloser Geselligkeit. Danken wir darum zum Schluß unserer Stadt, die uns in einer schönen Tradition nunmehr einlädt in den Bürgermeistersaal.

## **MITTEILUNGEN**

### **Veröffentlichungen**

Im Berichtsjahr wurden veröffentlicht:

Jahrbuch 2004 der BWG mit 272 Seiten

Abhandlungen der BWG, Band 54 mit 286 Seiten

### **Geschäftliche Mitteilungen:**

Am 31.12.2004 gehörten der BWG 141 ordentliche Mitglieder an, davon 80 unter 70 Jahren, sowie 71 korrespondierende Mitglieder. Die Zahl der Mitglieder unter 70 Jahren betrug in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften 31, in der Klasse für Ingenieurwissenschaften 24 und in der Klasse für Geisteswissenschaften 25. Von den ordentlichen Mitgliedern zählten zum Bereich Braunschweig 80, zum Bereich Clausthal 12, zum Bereich Göttingen 8, zum Bereich Hannover 39 und zum Bereich Osnabrück 2.

Das Plenum trat am 09.12.2005 zu seiner jährlichen Hauptsitzung zusammen, nahm die Jahresberichte des Präsidenten und des Generalsekretärs entgegen und beschloss den Haushalt 2006. In der Wahlsitzung am 09.12.2005 wurden die auf den Seiten 212 ff. vorgestellten Mitglieder zugewählt.

Das am 09.12.2005 tagende Konzil wählte den Gauß-Preisträger 2006 und legte die Feierliche Jahresversammlung auf den 23.06.2006 fest.

## PERSONALIA

### Todesfälle

- 24.01.2005 Günter Neumann, Dr.phil., Prof.em. für Sprachwissenschaften, Universität Würzburg. Korrespondierendes Mitglied der Klasse für Geisteswissenschaften seit 1988.
- 17.03.2005 Lászlo Fejes Tóth, Dr., Prof. u. Direktor des Mathematischen Forschungsinstituts der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest. Korrespondierendes Mitglied der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften seit 1977. Gauß-Preisträger 1977.
- 24.04.2005 Karl Popp, Dr.-Ing.habil. Prof. E.h., Prof. für Mechanik, Universität Hannover. Ordentliches Mitglied der Klasse für Ingenieurwissenschaften seit 1998.
- 23.06.2005 Bekir Dizioğlu, Dr.-Ing., Prof.em. für Getriebelehre und Maschinendynamik der TU Braunschweig. Ordentliches Mitglied der Klasse für Bauwissenschaften bzw. Ingenieurwissenschaften seit 1975.
- 09.07.2005 Jürgen Ruge, Dr.-Ing., Prof. für Schweißtechnik und Werkstofftechnologie der TU Braunschweig. Ordentliches Mitglied der Klasse für Ingenieurwissenschaften ab 1974, korrespondierendes Mitglied seit 1993.
- 05.08.2005 Raymond Klibansky, Dr.phil. Dr.phil.h.c., Prof. für Philosophie (Logik und Metaphysik) an der McGill University Montreal/Kanada und Fellow des Wolfson College Oxford. Korrespondierendes Mitglied der Klasse für Geisteswissenschaften seit 1992. Gauß-Preisträger 1990.
- 15.08.2005 Karl Kordina, Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h., Prof.em. für Stahlbeton- und Massivbau an der TU Braunschweig. Ordentliches Mitglied der Klasse für Bauwissenschaften bzw. Ingenieurwissenschaften seit 1966.
- 10.11.2005 Manfred Röhrs, Dr.rer.nat., Prof.em. für Zoologie an der Tierärztlichen Hochschule Hannover. Ordentliches Mitglied der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften seit 1978.
- 14.11.2005 Wolfgang Zerna, Dr.-Ing. Dr.-Ing.h.c.mult., Prof.em. für Konstruktiven Ingenieurbau an der Universität Bochum. Ordentliches Mitglied der Klasse für Bauwissenschaften bzw. Ingenieurwissenschaften von 1963 bis 1971, danach korrespondierendes Mitglied.



## Nachrufe

BEKIR DIZIOGLU

\*13.12.1920 †23.06.2005

Am 23. Juni 2005 verstarb nach schwerer Krankheit Prof. em. Dr.-Ing. Bekir Dizioglu, ordentliches Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft seit 1975, im Alter von 84 Jahren in Konstanz. Dort lebte er seit 1999 in einem Wohnstift direkt am Bodensee zusammen mit seiner Frau Maria, nachdem er über Jahrzehnte in Wolfenbüttel ansässig gewesen war.

Bekir Dizioglu wurde am 13. Dezember 1920 in Istanbul, Türkei, geboren. Nach dem Abitur im Jahre 1937 kam er als Praktikant zum ersten Mal nach Deutschland. Im Anschluss daran nahm er sein Maschinenbaustudium an der TH Dresden auf und schloss es 1943 als Dipl.-Ing. ab. Schon ein Jahr später promovierte er an der TH Dresden zum Dr.-Ing. mit dem Thema „Schwingungserscheinungen an Spindeln“ bei Prof. Hermann Alt, einem der bekanntesten und erfolgreichsten Kinematiker in Deutschland. Zuvor war er noch kurzzeitig wissenschaftlicher Assistent bei Prof. Adolf Willers gewesen, der sich als angewandter Mathematiker durch sein Buch „Mathematische Instrumente“ besonders hervorgetan hatte. Bei Kriegsende musste auch Bekir Dizioglu Deutschland verlassen. Von 1945 bis 1946 arbeitete er zunächst als Konstrukteur für Textilmaschinen bei der Firma Sulzer in Winterthur, Schweiz, und ging dann nach Istanbul zurück. Von 1947 bis 1953 war er als Dozent an der TU Istanbul tätig, gleichzeitig aber auch als beratender Ingenieur in verschiedenen türkischen Industriebetrieben. Während dieser Zeit kam Bekir Dizioglu auch seiner Militärdienstpflicht bei der türkischen Marine nach, wo er den Rang eines Korvettenkapitäns erreichte. Danach erfolgte im Jahre 1953 die Berufung zum ordentlichen Professor an die Fakultät für Maschinenbau der TU Istanbul.

In den folgenden Jahren baute Bekir Dizioglu seine guten wissenschaftlichen und persönlichen Kontakte zu Deutschland aus. Die Teilung des Landes ließ eine neuerliche Orientierung nach Dresden an seine Alma Mater nicht zu. Stattdessen fiel der junge fähige und hochbegabte Wissenschaftler an der TH Braunschweig auf. Hermann Schäfer, Professor für Technische Mechanik, wurde fortan sein großer Förderer. Im Jahre 1960 erhielt Bekir Dizioglu eine Gastprofessur für sein Spezialfach „Getriebedynamik“ an der TH Braunschweig. Der neue Gastprofessor fand sowohl bei seinen Kollegen als auch bei den Studenten des Maschinenbaus großen Widerhall mit der Einführung neuer wissenschaftlicher analytischer und numerischer Methoden auf dem Gebiet der Getriebeanalyse und auf dem Gebiet der Getriebesynthese unter Berücksichtigung dynamischer Belange für den Schnelllauf von Getrieben (Mechanismen) und Maschinen. Zusätzlich hat er sich in nicht unerheblichem Maße mit Schmierungs- und Reibungsfragen im Hinblick auf die Gelenke von Getrieben beschäftigt. Da

fügte es sich gut, dass Robert Kraus, Professor und Inhaber des Lehrstuhls für Getriebe- und Konstruktionslehre an der TH Braunschweig, emeritiert wurde. Mit Bekir Dizioglu fand sich 1965 ein würdiger Nachfolger mit Elan und Kreativität. Ein Jahr später wurde der Lehrstuhl in Institut für Getriebelehre und Maschinendynamik umbenannt und damit der Kompetenz des neuen Leiters und Direktors optimal angepasst.

Am Institut für Getriebelehre und Maschinendynamik waren 1966 neben dem Leiter zwei wissenschaftliche Mitarbeiter und eine Verwaltungsangestellte tätig. Der Dienstbetrieb begann in notdürftig hergerichteten Räumen am Bültenweg in einer ehemaligen Fabrikationshalle der Klavierfabrik Grotrian-Steinweg. Dennoch: Bekir Dizioglu hatte frühzeitig erkannt, dass sein Institut in Forschung und Lehre nur bestehen konnte, wenn neben einer guten theoretischen Grundlage auch die experimentelle Seite nicht zu kurz kam. Für den Ingenieurstudenten ist auch heute noch beides wichtig, Theorie und Praxis müssen sich in einem ausgewogenen Maße ergänzen. So trieb er den Aufbau einer feinmechanischen Werkstatt und eines Getriebe- und Maschinenlabors personell und sachlich tatkräftig voran, wobei ihm die damalige stürmische Entwicklung von Geräten zur Messung von mechanischen Größen zu Hilfe kam. Da die Kosten für präzise Werkzeugmaschinen und für hochwertige elektronische Messgeräte sehr rasch die finanziellen Möglichkeiten seines und der anderen Institute der Mechanik bei den Maschinenbauern und Bauingenieuren überstiegen, gründete Bekir Dizioglu zusammen mit Herrmann Schäfer und anderen Kollegen 1968 das Mechanikzentrum an der TH/TU Braunschweig. Von diesem Zusammenschluss konnten dann alle „Mechaniker“ profitieren, Wissenschaftler, Mitarbeiter und Studenten, weil sie auf gemeinsame Ressourcen zurückgreifen konnten. Die parallel dazu in Gang gekommene Entwicklung der digitalen Rechentechnik tat ein Übriges, um das Institut in der wissenschaftlichen Bedeutung auf dem Gebiet der Getriebelehre und Maschinendynamik national und international voran zu bringen. Einen besonderen Schub für die Forschungsaktivitäten mit neuen Möglichkeiten der Einwerbung von Drittmitteln gab es zuletzt noch einmal im Jahre 1983, als das Institut in renovierte und für Werkstatt und Labor speziell eingerichtete Räume in der Spielmannstraße 11a ziehen konnte. Zu diesem Zeitpunkt war der große Wunsch von Bekir Dizioglu in Erfüllung gegangen, gemeinsam mit seinen Mitarbeitern in adäquaten Räumen zu forschen und zu lehren. Es gab nämlich inzwischen drei wissenschaftliche Mitarbeiter, acht technische Mitarbeiter/innen in Werkstatt und Labor und zwei Verwaltungsangestellte.

Bekir Dizioglu war seit 1966 ständiger Gastprofessor an der Middle East Technical University of Ankara, Türkei. Die türkische Regierung verlieh ihm im Jahre 1967 für seine Verdienste um die Technik und den Wissenschaftleraus-tausch zwischen der Türkei und Deutschland den Staatspreis für Wissenschaft und Technik. Im Jahre 1975 wurde Bekir Dizioglu ordentliches Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (BWG) und nutzte deren

Abhandlungen für zahlreiche Veröffentlichungen mit besonders hohem theoretischen Anspruch.

Bekir Dizioglu hat im Laufe seiner wissenschaftlichen Tätigkeit an der TH/TU Braunschweig 15 Doktoranden als Doktorvater betreut und bis zu seiner Emeritierung im März 1989 und danach rund 100 Veröffentlichungen auf seinen Fachgebieten Getriebelehre und Maschinendynamik herausgegeben, darunter die drei wichtigen Bände zu den Grundlagen, der Maßbestimmung und der Dynamik der Getriebelehre im Verlagshaus Vieweg, die den Inhalt seiner Vorlesungen in diesen Disziplinen bildeten. Darüber hinaus gibt es von ihm auch rund 100 Referate und Kurzmitteilungen im „Zentralblatt für Mathematik und ihre Grenzgebiete“. In die ehrenamtliche Gemeinschaftsarbeit des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) hat sich Bekir Dizioglu ebenfalls aktiv eingebracht, in die Richtlinienarbeit als langjähriger Obmann des Ausschusses „Getriebedynamik“, als Lehrgangsleiter beim VDI-Bildungswerk und als Mitglied des Fachbereichs Getriebetechnik in der VDI-Gesellschaft Entwicklung-Konstruktion-Vertrieb (EKV).

Bekir Dizioglu liebte sein kleines, überschaubares Institut, er war nicht der Typ des Managers, vielmehr der des Familienvaters für seine Institutsmitarbeiter/innen, und er besaß eine wertvolle Tugend zugunsten seiner Umgebung: Er war sehr geduldig und brachte Verständnis auf, wenn Planungen und Dinge Weile brauchten. Die Umwidmung seines Instituts in ein Institut für Fertigungsautomatisierung und Handhabungstechnik nach seiner Emeritierung hat er einsehsvoll mitgetragen und dem neuen Leiter im Februar 1990 ein geordnetes Haus übergeben können.

Jürgen Hesselbach

Hanfried Kerle

#### KARL KORDINA

\*07.08.1918 †14.09.2005

Unser Kollege Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Karl Kordina ist am 14. August 2005, eine Woche nach seinem 86. Geburtstag, in Braunschweig verstorben. Stets blieb Karl Kordina der Technischen Universität Braunschweig und „seinem“ Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) verbunden, wo er von 1959 bis zu seiner Emeritierung im Jahre 1987 und darüber hinaus bis vor wenigen Wochen lehrte und forschte. Mit wachem Geist, wissenschaftlichem Interesse und seinem unnachahmlichen Charme war er auch fast zwanzig Jahre nach seinem Ausscheiden aus dem aktiven Dienst als Hochschullehrer fast täglich an seinem Schreibtisch im Institut anzutreffen.

Seit 1964, über vierzig Jahre, war Karl Kordina ordentliches Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

Wir erinnern uns in hoher Anerkennung, dass allein in den letzten Jahren seines Schaffens mehr als zwanzig Publikationen in Fachzeitschriften erschienen sind, zu sehr unterschiedlichen Themen aus dem beeindruckenden Repertoire seines wissenschaftlichen Wirkens – viele seiner weit gefächerten wissenschaftlichen Themen haben ihn bis zuletzt nicht losgelassen. Gerade im Zusammenhang mit der Entwicklung des europäischen Regelwerks zum Brandschutz sowie mit der Neufassung der DIN 1045 hat er sich noch kürzlich mit durchdachten und wegweisenden Gedanken geäußert. Für die jungen wissenschaftlichen Mitarbeiter am iBMB war Karl Kordina auch in den letzten Jahren stets ein wichtiger Gesprächspartner und Lehrer; zahlreiche noch jüngst entstandene Dissertationen lassen seine Handschrift erkennen. Sein reicher Erfahrungsschatz spiegelt das beeindruckende Spektrum der Themen aus der Ingenieurpraxis, denen er sich in seiner langen wissenschaftlichen Schaffenszeit zuwandte, entstanden aus seinem Wirken über Fachgrenzen hinweg, von den Werkstoffen und der Bauphysik über das Verhalten im Brandfall bis zur Bemessung und Konstruktion im Stahlbeton- und Spannbetonbau. So ist sein wissenschaftlicher Themenkatalog vom Alkalitreiben, Betonverhalten im Brandfall, Zugkriechen und Schallschutz bis zum Querkrafttragverhalten, zum Stabilitätsversagen und zur Bewehrung von Rahmenecken im Stahlbeton- und Spannbetonbau wohl ohne Entsprechung und vollständig nicht zu beschreiben.

Obwohl anlässlich der vielen Ehrungen, die Karl Kordina erhielt – wie der Ehrendoktorwürde an der Universität Bochum, der Emil Mörsch-Gedenkmünze, der DIN-Nadel, des Bundesverdienstkreuzes am Bande und weiterer –, seine Leistungen schon oft gewürdigt wurden, sei hier mit einem erneuten Blick auf den Lebensweg dieses herausragenden Ingenieurs, Wissenschaftlers und Lehrers an ihn erinnert.

Karl Kordina wurde am 7. August 1919 als Sohn eines Wiener Notars geboren und verbrachte seine Schulzeit bis zum Abitur 1937 in Wien. Bereits 1941 diplomierte er an der TH Wien als Bauingenieur und wurde nach nur kurzer Tätigkeit im Brückenbau bei der Reichsbahn in Wien an die Ostfront eingezogen. Nach mehrfacher Verwundung und erneuter zwischenzeitlicher Tätigkeit bei der Reichsbahn geriet er 1945 kurzzeitig in Gefangenschaft. Die schwierigen Verhältnisse nach 1945 führten ihn nach Deutschland, zunächst in die Bauindustrie. Dort war er tätig im Bau von Stahl- und Stahlbetonbrücken, im Holz- und Hallenbau, gewann erste Erfahrung im Spannbetonbau. Von prägender und entscheidender Bedeutung für die weitere Entwicklung von Karl Kordina war sein Wechsel an die damalige TH München, an das Materialprüfungsamt für das Bauwesen, wo er als Abteilungsleiter tätig wurde. Die nun beginnende Arbeit bei Prof. Rüsç führte ihn zu intensiver Forschung auf unterschiedlichsten Gebieten des Beton- und Spannbetonbaus, des Holz- und Stahlbaus, über Mauerwerk und Gerüste, schließlich auch zur Auseinandersetzung mit damals noch unzureichend beantwortbaren Stabilitätsfragen im Stahlbetonbau. Seine 1957

fertiggestellte Dissertation „Stabilitätsuntersuchungen an Beton- und Stahlbetonstützen“ war bahnbrechend. Aus seiner Münchner Zeit resultierten zahlreiche kollegiale Freundschaften an der TH München, Freundschaften zu anderen, heute herausragenden Ingenieurpersönlichkeiten, von denen viele den letzten Gang von Karl Kordina am 14. August 2005 in Braunschweig begleiteten.

1959 wurde Karl Kordina an die damalige TH Braunschweig berufen, als Ordinarius für Baustoffkunde und Stahlbetonbau, in der Nachfolge von Theo Kristen. Dessen Arbeitsgebiete Schallschutz und Bauteile unter Feuerangriff waren für Karl Kordina völlig neu. Er nahm die Herausforderung an, führte gegen manche Widerstände seinen Lehrstuhl und ein weiteres Baustofflaboratorium unter dem Namen Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung zusammen und initiierte den Neubau des seinerzeit größten und modernsten deutschen Stahlbetonlaboratoriums an der Beethovenstrasse, dem auch heutigen Sitz des iBMB und der Materialprüfanstalt. Mit dem Bezug des Neubaus 1964 wurde von Karl Kordina auch die damals „Amtliche Materialprüfanstalt“ ins Leben gerufen, die seither eng kooperierend mit dem Institut arbeitet.

In den neuen Räumen begann unter der Leitung von Karl Kordina eine ungemein erfolgreiche Schaffensperiode mit weltweiter Ausstrahlung und eine stetige Erweiterung der Arbeitsfelder. 1968 wechselte er intern auf den Lehrstuhl für Stahlbeton- und Massivbau, als Baustoffwissenschaftler kam Gallus Rehm, später Ferdinand Rostásy hinzu. 1973 nahm der Sonderforschungsbereich SFB 148 „Brandverhalten von Bauteilen“, initiiert von Karl Kordina und 14 Jahre von ihm als Sprecher geleitet, seine Arbeit auf. Die Zahl der Mitarbeiter des 1978 auf den heutigen Namen Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz umbenannten Großinstituts mit angeschlossener Materialprüfanstalt wuchs auf über 200. Forschungsarbeiten in allen Bereichen der Baustoffwissenschaften, des Stahlbeton- und Massivbaus wurden durchgeführt, Bauschadensforschung und Forschung zur Bauinstandsetzung wurden entwickelt, eine Abteilung für Kunststoffe hinzugefügt und vieles mehr. Die liebevollen Titel „Knickpapst“ und später „Brandpapst“ zeugen noch heute von der Bedeutung seiner Forschungen.

Im Jahre 1987, im Alter von 68 Jahren, wurde Karl Kordina emeritiert. In den Ruhestand ging er aber keinesfalls. Befreit von manchen Lasten in der Lehre, der Selbstverwaltung und der Institutsleitung widmete er sich umso intensiver der Forschung. Weiterhin warb er mit Mitarbeitern Forschungsprojekte ein, führte Tunnelbrandversuche in Norwegen durch, erforschte weiterhin die Konstruktion von Rahmenecken und die Stabilität schlanker Stützen, erarbeitete Anwendungshilfen für den EC 2. Nach der Wende half er der Universität Leipzig als Gründungsdirektor beim Aufbau einer modernen Materialprüfanstalt.

Ein vollständiges Bild über das Schaffen von Karl Kordina kann angesichts der Fülle und Vielfalt seiner Arbeiten kaum gelingen. Über 300 Publikationen verfasste er, war in zahllosen nationalen und internationalen Gremien tätig.

Karl Kordina hinterlässt unschließbare Lücken, als großer Forscher und Lehrer, als Gründungsvater des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, als erfahrener und einfühlsamer Kollege, als Violinist bei Feiern und Ehrungen an der TU Braunschweig, als scharfsinniger Denker und Mahner in Sitzungen und Zusammenkünften, als lebensfroher und charmanter, stets hilfsbereiter Mensch. Er wird uns sehr fehlen; die Erinnerung und Wertschätzung werden fortbestehen.

Harald Budelmann

#### JOHANNES-WERNER PARTENSCKY

\*03.04.1926 †03.12.2004

Am 3. Dezember 2004 verstarb Johannes-Werner Partenscky, emeritierter Ordinarius für Wasserbau und Küsteningenieurwesen an der Universität Hannover, im Alter von 78 Jahren.

Geboren am 3. April 1926 in Stettin und aufgewachsen in dem kleinen Städtchen Barth an der Darß-Zingster-Boddenkette entwickelte Hans-Werner, wie er sich später immer nannte, in frühen Jahren seine Liebe zur See und zur Jagd, und so sollte die Küste zu seiner beruflichen Bestimmung und das Jagen zu seinem größten Hobby werden. Hans-Werner Partenscky gehörte zu der Generation, die noch vor Kriegsende zum Militärdienst einberufen wurde. Nach knapp zwei Jahren in Kriegsmarine und Gefangenschaft bildete er sich zuerst zum Facharbeiter im Maurerhandwerk aus, um schließlich von 1948 bis 1953 Bauingenieurwesen an der Technischen Hochschule Karlsruhe zu studieren.

Nach dem Studium begann Hans-Werner Partenscky seine wissenschaftliche Tätigkeit als Assistent am Theodor-Rebock-Flussbaulaboratorium der TH Karlsruhe, wo er 1957 mit der Dissertation „Einfluss der Schleusenfüllungen auf den Wasserstand und die Schifffahrt in einer Kanalhaltung“ zum Dr.-Ing. promoviert wurde, einem Thema, das durch die Planungen am Rhein-Main-Donaukanal inspiriert war. Es folgten zwölf wechselvolle und prägende Jahre an Stätten von Forschung und Lehre in mehreren Ländern. Ein Fulbright-Stipendium führte ihn 1958 für ein Jahr an das Hydrodynamics Laboratory des Massachusetts Institute of Technology. Danach kehrte er als Oberingenieur an die TH Karlsruhe zurück, blieb dort aber nur eineinhalb Jahre, denn schon im Herbst 1961 wechselte er als Gastprofessor an die Laval Universität in Quebec, Kanada, und wurde dort bald Associate Professor. Er ließ es sich trotzdem nicht nehmen, in dieser Zeit eine ursprünglich für die Universität Karlsruhe als Habilitationsschrift konzipierte Arbeit über dynamische Kräfte auf Schleusentore zu Ende zu führen, sie in französischer Sprache an der Universität Toulouse, Frankreich, einzureichen und einen zweiten Dokortitel, nämlich den Docteur en

physique zu erwerben. Nach vier Jahren in Quebec nahm er einen Ruf als Full Professor an der Ecole Polytechnique der Universität Montreal, Kanada, an. Es war in Quebec und Montreal, wo sich der fachliche Schwerpunkt seiner Lehre und Forschung zunehmend vom binnenländischen Wasserbau, wie er in Karlsruhe gepflegt wurde, zum Küsteningenieurwesen verlagerte. Angeregt durch die Lage am mächtigen Sankt Lorenz-Strom wurde vor allem die Gezeitendynamik in Flussmündungen sowie das Eindringen von Salinität ein Schwerpunktthema, das er in mehreren vom kanadischen National Research Council geförderten Projekten bearbeitete und mit dem er auf internationalen Konferenzen Aufmerksamkeit erregte. In Englisch und Französisch brillierend und ausgestattet mit Witz und Charme und einer ausgeprägten Selbstsicherheit, gewann er unzählige berufliche und private Freunde weltweit, und er pflegte diese Kontakte intensiv sein ganzes Leben lang. Und schließlich war kein Land besser geeignet als Kanada, um seine Leidenschaft zum Jagen und Fischen wieder neu zu beleben. Auch für die Familie – er hatte mit seiner Frau zwei noch in Deutschland geborene Töchter – war Montreal im Grenzgebiet von Sprachen und Kulturen durchaus ein facettenreiches Lebensumfeld.

Er war 45 Jahre alt, als er im Mai 1971 den Ruf an die Universität Hannover erhielt, nach kurzem Zögern annahm und Nachfolger von Walter Hensen wurde. Mit der Professur war die Leitung des bedeutenden Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau, bald danach umbenannt in Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, verbunden. Die Bedeutung, die dieses Institut unter Hensen hatte, kann nicht überschätzt werden. Ausgestattet mit einer Vielzahl experimenteller Einrichtungen und im Vergleich zu heute mit vielen Planstellen, war es die Instanz schlechthin für Fragen des Wasserbaus und des Küsteningenieurwesens im Norddeutschen Raum. Es gab kaum ein größeres Vorhaben, an dem es nicht beteiligt war. So war es ein Schock für alle, als Walter Hensen im Mai 1971 unerwartet verstarb und der Neuberufene, bis dahin ausschließlich an Universitäten tätig, sich von einem auf den anderen Tag in der Verantwortung nicht nur für Lehre und Forschung, sondern auch als Beratender Ingenieur für viele Auftragsprojekte sah. Zusammen mit einigen sehr fähigen und erfahrenen Mitarbeitern meisterte er die Situation blendend, was für seinen persönlichen Ruf wie den des Instituts bei Behörden und in Ingenieurfirmen bedeutungsvoll war. Aber er setzte auch neue Akzente, inspirierte durch seine internationale Prägung und seine Erfahrung in der Forschung. Wie er selbst nahmen bald auch die Mitarbeiter an internationalen Konferenzen teil, und die Verbindung von Grundlagenforschung und Ingenieuraufträgen wurde zu einem Qualitätsmerkmal des Instituts, das es auf die Weltkarte der Forschung im Küsteningenieurwesen setzte. Sichtbarer Ausdruck dafür waren der Sonderforschungsbereich 79 „Wasserforschung im Küstenbereich“ in den Jahren 1979 bis 1982, und unmittelbar anschließend der Sonderforschungsbereich 205 „Küsteningenieurwesen“ in den Jahren 1983 bis 1994, die es ohne die ganz maßgebliche Beteiligung des

Franzius-Instituts nicht gegeben hätte. Der Große Wellenkanal in Hannover-Marienwerder, der 1983 in Betrieb genommen wurde, war seinerzeit mit Kosten von 20 Mio. DM die größte Einzelinvestition der DFG. Er ist ein Ergebnis einer im SFB79 entstandenen Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Braunschweig und wird noch heute als eine gemeinsame Einrichtung betrieben.

Hans-Werner Partenscky betreute als Doktorvater 38 Promotionen und vier Habilitationen. Mehrere seiner ehemaligen Mitarbeiter wurden Professoren an anderen Hochschulen. Die Zahl seiner wissenschaftlichen Veröffentlichungen stieg auf 176 und die der technisch-wissenschaftlichen Berichte und Gutachten auf 350. Hinzu kommen zwei beim Springer-Verlag erschienene Fachbücher über Schiffshebewerke (1984) und Schleusenanlagen (1985).

Die vielen bedeutenden Ehrungen, die er erhielt, zeugen gleichermaßen von seinem wissenschaftlichen Ruf und seinen internationalen Kontakten. 1981 wählte ihn unsere Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft zum ordentlichen Mitglied. Im Jahre 1985 wurde er Ehrenprofessor der Hohai-Universität Nanjing, China. 1988 wählte ihn die Hafenbautechnische Gesellschaft zu ihrem Ehrenmitglied. 1991 erhielt er die Verdienstmedaille der Technischen Universität Gdansk (Danzig). Die Universität Wroclaw (Breslau) ernannte ihn 1991 zum Ehrendoktor. 1997 verlieh ihm der Bundespräsident in Anerkennung seiner wissenschaftlichen Verdienste und seiner internationalen Tätigkeit das Verdienstkreuz am Bande. Schließlich erhielt er noch 1999 eine weitere hohe Auszeichnung durch die Verleihung der Ehrenmedaille der Belgischen Akademie der Wissenschaften.

Nach seiner Emeritierung im Jahre 1991 zog sich Hans-Werner Partenscky zwar aus der Institutstätigkeit voll zurück, führte aber einige seiner fachlichen Arbeiten weiter, und vor allem pflegte er intensiv den Kontakt mit früheren Kollegen und Mitarbeitern und seinen Freunden in aller Welt. Auch viele Mitglieder der BWG erinnern sich an unterhaltsame Abende in seinem trophäengeschmückten Penthaus mit ihm und seiner zweiten Frau Susanne, die er 1984 geheiratet hatte. Er verbrachte regelmäßige Aufenthalte auf Sylt, an dessen Küstenschutz er früher mitgearbeitet hatte, erfüllte dort bis vor wenigen Jahren jährlich die Anforderungen an das Sportabzeichen und erfreute sich mehrerer großer Schiffsreisen.

Im Mai 2003 erlitt Hans-Werner Partenscky einen Schlaganfall. Er erholte sich recht gut, nahm dies aber zum Anlass, für seine Familie und Freunde seine Lebenserinnerungen mit dem Titel „Mein Leben, meine berufliche Laufbahn und meine jagdlichen Erlebnisse“ aufzuschreiben. Sie sind der Spiegel eines mit vielen Gaben ausgestatteten, erfolgreichen und lebensfrohen Menschen. So wird er uns in Erinnerung bleiben.

Werner Zielke



## JÜRGEN RUGE

\*14.05.1921 †07.07.2005

Am 7. Juli 2005 starb unser Braunschweiger Kollege, Herr Universitätsprofessor em. Dr.-Ing. Jürgen Ruge, im Alter von 84 Jahren in München. Bis zu seiner Emeritierung im Jahre 1989 war er Direktor des Instituts für Schweißtechnik und Werkstofftechnologie der TU Braunschweig sowie Leiter der amtlich anerkannten Materialprüfstelle für Schweißtechnik und Werkstoffe.

Am 14. Mai 1921 in Berlin geboren, begann er nach dem Abitur mit dem Studium des Maschinenbaus an der Technischen Hochschule Berlin, musste aber, weil politisch unbeliebt, schon 1940 nach einem Semester das Studium abbrechen. In einem kriegswichtigen Betrieb lernte er Maschinenschlosser, wurde Konstrukteur und als Frontarbeiter dienstverpflichtet. Nach dem Krieg studierte er in Göttingen ein Semester Physik. Nach Braunschweig kam er im Frühjahr 1946, räumte zunächst Trümmer, reparierte Bau- und Werkzeugmaschinen, um schließlich das Maschinenbaustudium wieder aufzunehmen. In den ASTA gewählt, übernahm er das Pressereferat und kümmerte sich um elementare Bedürfnisse der Studenten. Nach der Diplomprüfung 1949 erwog Jürgen Ruge, nach Amerika auszuwandern, folgte dann aber dem Angebot seines Lehrers Professor Wilhelm Hofmann. Als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Werkstoffkunde und Herstellungsverfahren verfasste er eine Dissertation zum Thema „Die Kalt-Pressschweißung von Metallen“ und wurde 1953 mit Auszeichnung zum Dr.-Ing. promoviert. Die erarbeiteten Erkenntnisse gehören noch heute zu den Grundlagen der Schweißtechnik.

Mit der Zusatzqualifikation „Schweißfachingenieur“ hatte sich Jürgen Ruge gleichzeitig für die schweißtechnische Praxis qualifiziert. Im Herbst 1953 begann er als Forschungsingenieur bei der Linde AG und wurde ein Jahr später vom Deutschen Verband für Schweißtechnik e. V. mit der Leitung der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt München betraut, die er zuvor nebenberuflich aus kleinsten Anfängen aufgebaut hatte. Sein Konzept, neben einer gründlichen Ausbildung von Schweißern und Schweißfachleuten Entwicklungsarbeiten und Gutachten für die Industrie durchzuführen, trug Früchte. In den folgenden zehn Jahren entwickelte er die SLV München zu einer weithin bekannten und anerkannten Anstalt.

1957 erhielt er den Lehrauftrag für das Fach „Grundlagen der Schweißtechnik“ an der Technischen Hochschule München und wurde nebenberuflich Dozent für Fügetechnik und Kunststoffe an der Höheren Technischen Schule der Luftwaffe in Neubiberg. Diese Aufgaben nahm er wahr bis zu seiner Berufung auf den Lehrstuhl für Schweißtechnik und Werkstofftechnologie in Braunschweig im Mai 1965, der bald danach in ein Institut mit angeschlossener amtlich anerkannter Materialprüfstelle umgewandelt werden konnte.

Im neuen Gebäude am Langen Kamp besorgte er mit großer Tatkraft und Beharrlichkeit den Ausbau und die Ausstattung mit modernen Schweiß- und Prüfanlagen und schuf und prägte so ein Institut, das weltweit höchste Anerkennung erlangte. Aus den weit gespannten Forschungsaktivitäten ragen als Schwerpunktthemen heraus: Untersuchungen zum Verhalten der Werkstoffe beim und nach dem Schweißen, zur Festigkeit von Schweißverbindungen, zur Auswirkung von Gasen im Schweißgut und in angrenzenden Zonen, zu den Bindevorgängen beim Pressschweißen sowie Arbeiten zu den modernen Schweißverfahren mittels Laser- und Elektronenstrahl und Analysen der Prozesse beim Schweißen und thermischen Schneiden mit dem Ziel der qualitätsorientierten Prozesskontrolle und -regelung. 280 Veröffentlichungen, darunter mehrere Fachbücher, und 60 Dissertationen sind eindrucksvolle Belege für die Breite der Forschungsarbeiten und deren Bedeutung für die weitere Entwicklung der Schweißtechnik. Mit dem vierbändigen „Handbuch der Schweißtechnik“ hat Jürgen Ruge ein Standardwerk für jeden Schweißingenieur und -konstrukteur geschaffen und mit seinen knappen, präzisen Darstellungen breite Anerkennung erfahren.

Die Mitwirkung in Gremien der akademischen Selbstverwaltung der Technischen Universität und der forschungsfördernden Institutionen sah er als eine selbstverständliche Pflicht. Als Leiter des Fachbereichs Maschinenbau von 1968 bis 1970 geriet er schnell ins Visier der Achtundsechziger, denen er auch als Vorsitzender des örtlichen Hochschulverbandes entschiedenen Widerstand entgegensetzte. Dieser richtete sich nicht gegen berechtigte Anliegen der Studenten, sondern gegen sich formierende linke Strömungen an der Universität. 1974 bis 1976 übernahm er das Amt des Dekans der Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik. In die Senatsausschüsse für Sonderforschungsbereiche und Internationale Angelegenheiten der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurde er 1977 berufen. 1979 war er Mitglied der Deutsch-Koreanischen Kommission von DFG und KOSEF. Schon 1965 entsandte ihn die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen in ihren Wissenschaftlichen Rat.

1970 freute sich Jürgen Ruge über die Aufnahme als ordentliches Mitglied in die Klasse der Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft. Die Auszeichnung mit der Ludwig-von-Tetmajer-Medaille der Technischen Universität Wien, die er 1990 erhielt, würdigte sowohl seine Verdienste um die Entwicklung neuer Schweißverfahren und der Prüftechnik als auch deren Überführung in die Lehre und Praxis.

Stark engagierte er sich in nationalen und internationalen Fachverbänden. Im Deutschen Verband für Schweißtechnik gehörte er von 1974 bis Ende 1989 als Vorsitzender des Technischen Ausschusses dem Präsidium und dem Vorstandsrat an. 1970 erhielt er die DVS Ehrennadel, und 1989 wurde er für sein Lebenswerk im Interesse der schweißtechnischen Gemeinschaftsarbeit mit der DVS-Plakette ausgezeichnet, der höchsten Ehrung dieses Verbandes. Schon seit 1958

war er Deutscher Delegierter des International Institute of Welding und ständiges Mitglied in dessen Governing Council. Auch im Beirat der VDI-Gesellschaft für Werkstofftechnik wirkte er seit 1979 mit.

Zahlreiche internationale Kontakte mit Gastprofessuren in Indien 1968, Korea 1977 und später in China ermöglichten einen fruchtbaren Austausch von Wissenschaftlern und Doktoranden mit lang anhaltenden Kooperationen. In Anerkennung seiner Verdienste wurde er 1977 Ehrenmitglied der Japan Welding Society und 1987 zum Ehrenprofessor des Harbin Institute of Technology der Volksrepublik China ernannt.

Jürgen Ruge war ein vorbildlicher Mensch und akademischer Lehrer, mutig, fleißig, geradlinig, sparsam, prinzipientreu ohne dabei stur zu sein, loyal gegenüber seinen Mitarbeitern, von denen er viel forderte, ihnen aber auch Freiräume ließ. Man kann in ihm einen der letzten Preußen erkennen – im Sinn der als preußisch bezeichneten Tugenden. Wie kaum ein anderer hat er dazu beigetragen, die von vielen als besseres Handwerk eingeordnete Schweißtechnik von diesem Image zu befreien und durch fundierte Forschungsergebnisse zu einer anerkannten Wissenschaft zu machen. Dieses Ziel kann heute als erreicht gelten.

Dem durch seine Lehre, seine Forschungsarbeiten und sein Wirken Hochgeschätzten bewahren die Mitarbeiter des heutigen Instituts für Füge- und Schweißtechnik, und alle, die ihn näher kannten, ein ehrendes Andenken in Dankbarkeit.

Karl Thomas    Helmut Wohlfahrt

## Zuwahlen

zu ordentlichen Mitgliedern wurden am **9. 12.2005** gewählt

### **in der Klasse für Geisteswissenschaften**

**Breger, Herbert**, Prof. Dr. phil., Leiter des Leibniz-Archivs Hannover, apl. Prof. an der Universität Hannover, Eichstr. 7, 30161 Hannover.

1946, 10.10. geboren in Fredersdorf / Uckermark  
 1966-1971 Studium der Mathematik und Physik in Berlin und Heidelberg  
 1971 Diplom in Mathematik (Universität Heidelberg)  
 seit 1977 Mitarbeiter am Leibniz-Archiv  
 1981 Promotion über die Entstehung des Energiebegriffs im 19. Jahrhundert (Universität Hannover)  
 1981-1993 Lehraufträge an den Universitäten Oldenburg und Hannover  
 1985 Forschungsaufenthalt an der Universität Utrecht  
 1991 Forschungsaufenthalt an Schwedischen Akademie in Stockholm  
 1992 Habilitation in Philosophie und Geschichte der Mathematik und Naturwissenschaft (Universität Hannover)  
 seit 1992 Leiter des Leibniz-Archivs  
 1995 apl. Professor an der Universität Hannover  
 1996 Forschungsaufenthalt an der University of Pennsylvania  
 1997-2003 Mitglied der Kommission für die Tschirnhaus-Edition bei der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig  
 seit Jahr- Herausgeber der Zeitschrift „Studia Leibnitiana. Zeitschrift für Ge-  
 gang 2002 schichte der Phllsophie und der Wissenschaften“

Mehrere Monographien und Editionen, zahlreiche Aufsätze

**Wahrig, Bettina**, Prof. Dr. med., Professorin für Geschichte der Naturwissenschaften und der Pharmazie an der TU Braunschweig.

1956, 16.07. geboren am  
 1974 Abitur  
 1975-1983 Studium der Medizin und Philosophie in Mainz und Marburg.  
 1983 Staatsexamen und Approbation in Medizin  
 1983-1985 Studien- und Forschungsaufenthalt in Florenz; Mitarbeit an den Nietzsche-Studien, am Kommentar der Nietzsche-Ausgabe, Übersetzungen

- 1984 med. Promotion
- 1985-1997 Assistentin am Institut für Medizin- und Wissenschaftsgeschichte der Universität zu Lübeck
- seit 1997 Professorin für Geschichte der Naturwissenschaften und der Pharmazie, Lehre und Forschung auch in Gender Studies
- 2003 Gastwissenschaftlerin am Max Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin

O. Mitglied der Hamburgischen Akademie der Wissenschaften, Vizepräsidentin der Gesellschaft für Wissenschaftsgeschichte, Vorsitzende des Nationalkomitees der International Union for Philosophy & History of Science

Ca. 100 Publikation in den versch. Forschungsgebieten

#### **in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften**

**Sonar**, Thomas, Prof. Dr., Prof. für Technomathematik an der TU Braunschweig, Hildebrandstr. 35, 38112 Braunschweig

- 1958, 27.02. geboren in Sehnde
- 1980 Dipl.-Ing. für Maschinenbau an der FH Hannover
- 1980-1981 Labor-Ing. an der FH Hannover
- 1987 Dipl.-Math. an der Universität Hannover
- 1987-1989 Wiss. am Institut für Entwurfsaerodynamik der DLR in Braunschweig
- 1989-1991 Wiss. Mitarb. am Math. Inst. A der Universität Stuttgart
- 1990-1991 Promotionsstudium in Oxford
- 1991-1996 Math. am Inst. für Strömungsmechanik der DLR Göttingen
- 1991 Promotion zum Dr. rer. nat. an der Universität Stuttgart.
- 1995 Habilitation für Mathematik an der TH Darmstadt
- 1996-1999 Prof. für Angewandte Mathematik an der Universität Hamburg
- seit 1999 Prof. für Technomathematik an der TU Braunschweig

Mehrere Bücher, zahlreiche Aufsätze, Forschungsberichte und publ. Vorlesungen, Mitherausgeber der Math. Semesterberichte, ZAMP und ZAMM

**Stephan**, Ernst Peter, Prof. Dr. rer. nat., Prof. für angewandte Mathematik an der Universität Hannover, Veilchenstr. 5, 30900 Wedemark

- 1947, 18.05. geboren in Birkenau (Hessen)
- 1966 Abitur
- 1970 Staatsexamen in Math. und Physik an der TH Darmstadt

- 1970-1983 Wiss. Mitarb. an der TH Darmstadt  
 1975 Dr. rer. nat. (Mathematik) an der TH Darmstadt  
 1983-1988 Ass. Prof., School of Mathematics, Georgia Tech, Atlanta, USA  
 1984 Habilitation in Mathematik an der TH Darmstadt  
 1988-1989 Full Prof., School of Mathematics, Georgia Inst. of Technology, Atlanta, USA  
 seit 1989 Prof. am Inst. für Angewandte Mathematik der Universität Hannover  
 1993-1995 Honorary Visiting Prof., University of New South Wales, Sydney, Australien  
 seit 1978 Forschungsaufenthalte in Australien, Chile, England, Frankreich, Israel und den USA

Mitglied der ISIMM, des BENet, des DHV, Fulbright Vertrauensdozent der Universität Hannover, Stellv. Dir. des ICCES, Sprecher des DFG-Graduiertenkollegs GRK 615 „Interaction of Modelling, Computation Methods and Software Concepts for Scientific – Technological Problems“, Mitglied mehrerer int. Beratungskommissionen

Mehrere Bücher, ca. 190 Aufsätze und publ. Konferenzbeiträge

## Inhaber der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille 1949-2005

- 1949 *Walter Reppe* †, Dr. phil., Dr. phil. nat. h.c., Dr.-Ing. E.h., Honorarprofessor der Universität Mainz und der Technischen Hochschule Darmstadt.
- 1950 *Arvid Hedvall* †, fil. dr., Dr. phil. h.c., Dr.-Eng. h.c., Dr.Techn. h.c., em. o. Professor für Silikatchemie der Technischen Hochschule Göteborg/Schweden.
- 1951 *Wilhelm Nusselt* †, Dr.-Ing. E.h., em.o.Professor für Theoretische Maschinenlehre an der Technischen Hochschule München.
- 1952 *Erwin W. Müller* †, Dr.-Ing. habil., Dr. rer. nat. h.c., Dr. h.c., Evan-Pugh Res., Professor an der Pennsylvania State University, University Park, Penn./USA.
- 1953 *Gustav Wolf* †, Dr.-Ing.E.h., Professor in Münster.
- 1954 *Max Strutt* †, Dr.techn., Dr.-Ing.E.h., o. Professor für Höhere Elektrotechnik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich/Schweiz.
- 1955 *Fritz Arndt* †, Dr.phil., Dr.rer.nat.h.c., Dr.h.c., em. o. Professor für Organische Chemie an der Universität Breslau, Honorarprofessor an der Universität Hamburg.
- 1955 *Pascual Jordan* †, Dr.phil., em. o. Professor für Theoretische Physik an der Universität Hamburg.
- 1956 *Ulrich Finsterwalder* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., München.
- 1957 *Georg Sachs* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., o. Professor für Metallurgie an der Syracuse University, Syracuse, N.Y./USA.
- 1958 *Werner Schmeidler* †, Dr.phil., Dr.-Ing.E.h., em. o. Professor für Mathematik an der Technischen Universität Berlin.
- 1959 *Hans Brockmann* †, Dr.sc.nat.habil., Dr.rer.nat.h.c., em. o. Professor für Organische Chemie an der Universität Göttingen.
- 1960 *Theodor von Karman* †, Dr.phil., Dr.-Ing.E.h., Dr.rer.nat.h.c.mult., LL.D., Professor am California Institute of Technology, Pasadena, Calif./USA.
- 1961 *Kurt Paul Klöppel* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., o. Professor für Statik und Stahlbau an der Technischen Hochschule Darmstadt.
- 1962 *Walter Schottky* †, Dr.phil., Dr.-Ing.E.h., Dr.rer.nat.h.c., Dr.techn.h.c., em. o. Professor für Theoretische Physik an der Universität Erlangen.

- 1963 *Gottfried Köthe* †, Dr.phil., Dr.h.c., Dr.rer.nat.h.c.mult., em. o. Professor für Angewandte Mathematik an der Universität Heidelberg.
- 1964 *Carl Wagner* †, Dr.phil., Dr.rer.nat.h.c., Dr.-Ing.E.h., Professor und vormalig Direktor des Max-Planck-Instituts für Physikalische Chemie in Göttingen.
- 1965 *Albert Betz* †, Dr.phil., Dr.-Ing.E.h., Dr.sc.techn.h.c., Professor und vormalig Direktor der Aerodynamischen Versuchsanstalt und des Max-Planck-Instituts für Strömungsforschung in Göttingen.
- 1966 *Wilhelm Becker* †, Dr.phil., Dr.h.c., em. o. Professor und Direktor der Astronomisch-Meteorologischen Anstalt der Universität Basel/Schweiz.
- 1967 *Henry Görtler* †, Dr.phil.habil., LL.D.h.c., em. o. Professor für Mathematik und vormalig Direktor des Instituts für Angewandte Mathematik der Universität Freiburg i. Br..
- 1968 *Egon Orowan* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., o. Professor für Mechanical Engineering am Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass./USA.
- 1969 *E. Arne Bjerhammer*, tekn. dr., Professor für Geodäsie an der Kungl. Tekniska Högskolan in Stockholm/Schweden.
- 1970 *Elie Carafoli* †, Dr.rer.nat., Professor für Aero-Gas-Dynamik am Polytechnischen Institut Bukarest und vormalig Direktor des Institut de Mécanique des Fluides "Traian Vuia" in Bukarest/Rumänien.
- 1971 *Walter Dieminger* †, Dr.rer.techn., apl. Professor für Geophysik an der Universität Göttingen und vormalig Direktor des Max-Planck-Instituts für Aeronomie in Lindau/Harz.
- 1972 *Hubert Rüsch* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., em. o. Professor für Massivbau an der Technischen Hochschule München und vormalig Direktor des Amtlichen Materialprüfungsamtes für das Bauwesen.
- 1973 *Viktor Gutmann* †, Dr.techn., Ph.D., Sc.D., Dr.rer.nat.h.c., Dr.Sc.h.c., em. o. Professor für Anorganische Chemie an der Technischen Universität Wien/Österreich.
- 1974 *Friedrich Tamms* †, Dr.h.c., Professor, Beigeordneter der Stadt Düsseldorf (Stadtbaurat i.R.), Freischaffender Planer.
- 1975 *Sir Michael James Lighthill* †, FRS, FRAeS, Hon.D.Sc.mult., Professor für Mathematik an der University of Cambridge/Großbritannien.
- 1977 *Walter Maurice Elsasser* †, Dr.phil., o. Professor für Geophysik an der Johns Hopkins University, Baltimor, Maryland/USA.



- 1977 *Helmut Moritz*, Dr.techn., Dr.-Ing.E.h., o. Professor für Geodäsie an der Technischen Universität Graz/Österreich.
- 1977 *László Fejes Tóth* †, Dr., Professor und Direktor des Mathematischen Forschungsinstituts der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest/Ungarn.
- 1978 *Ulrich Grigull* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., em. o. Professor für Thermodynamik an der Technischen Universität München.
- 1979 *Wolf Freiherr von Engelhardt*, Dr.phil., em. o. Professor für Mineralogie und Petrographie an der Universität Tübingen.
- 1980 *Hans Kuhn*, Dr.phil., Dr.rer.nat.h.c., Professor und vormals Direktor am Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen.
- 1981 *Martin Kneser* †, Dr.rer.nat., o. Professor für Mathematik an der Universität Göttingen.
- 1982 *Walter Burkert*, Dr.phil., o. Professor für Klassische Philologie an der Universität Zürich/Schweiz.
- 1983 *Leopold Müller* †, Dr.techn., Dr.mont.h.c., Honorarprofessor für Felsmechanik an der Universität Salzburg/Österreich.
- 1984 *Heinz Beneking* †, Dr.rer.nat., o. Professor und Direktor des Instituts für Halbleitertechnik an der RWTH, Aachen.
- 1985 *Gerhard Ertl*, Dr.rer.nat., Dr.h.c., Professor und Direktor am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin.
- 1986 *Arno Borst*, Dr.phil., o. Professor für Mittelalterliche Geschichte an der Universität Konstanz.
- 1987 *Olgierd Cecil Zienkiewicz*, FRS, Ph.D., D.Sc., Hon.D.Sc.mult., Professor of Civil Engineering an der University of Wales/Swansea/Großbritannien.
- 1988 *Heinz Brauer*, Dr.-Ing., Professor für Chemische Ingenieurtechnik an der Technischen Universität Berlin.
- 1989 *Herbert Walther*, Dr.rer.nat., Professor für Experimentalphysik an der Universität München und Direktor des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching.
- 1990 *Raymond Klibansky* †, Dr.phil., Dr.phil.h.c., Professor der Philosophie (Logik und Metaphysik) an der McGill University in Montreal/Kanada und Fellow des Wolfson College Oxford.
- 1991 *Wilfried B. Krätzig*, Dr.-Ing. Dr.-Ing.E.h., Professor für Ingenieurmechanik an der Ruhr-Universität Bochum.

- 1992 *Ernst-Dieter Gilles*, Dr.-Ing., Professor für Meß- und Regelungstechnik an der Universität Stuttgart.
- 1993 *Hans-Heinrich Voigt*, Dr.rer.nat., em. o. Professor für Astronomie und Astrophysik an der Universität Göttingen.
- 1994 *Josef Fleckenstein* †, Dr.phil., em. o. Professor für Mittelalterliche Geschichte, zuvor Direktor des Max-Planck-Instituts für Geschichte in Göttingen.
- 1995 *David G. Crighton* †, FRS, Head of Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge/Großbritannien.
- 1996 *Gerhard Frey*, Dr.rer.nat., Dr.h.c., Professor für Mathematik an der Universität Essen.
- 1997 *Arnold Esch*, Dr.phil., Professor für Mittelalterliche Geschichte, Direktor des Deutschen Historischen Instituts in Rom/Italien.
- 1998 *Christian Menn*, Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., em. Professor für Konstruktiven Ingenieurbau an der ETH Zürich/Schweiz.
- 1999 *Christian Wandrey*, Dr.rer.nat., Professor für Biotechnologie, Universität Bonn, Direktor des Instituts für Biotechnologie des Forschungszentrums Jülich.
- 2000 *Klaus J. Hopt*, Dr.jur. Dr.phil. Dres.h.c., Professor für ausländisches und internationales Privatrecht, Universität Hamburg, Direktor des Max-Planck-Instituts für ausländisches und internationales Privatrecht, Hamburg.
- 2001 *Robert Piloty*, Dr.-Ing., Professor em. für Datentechnik an der Technischen Universität Darmstadt.
- 2002 *Wolfgang Krätschmer*, Dr.rer.nat., Professor für Kern- und Astrophysik am Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg.
- 2003 *Niklot Klüßendorf*, Dr.phil., apl. Professor für Numismatik und Geldgeschichte an der Philipps Universität, Marburg.
- 2004 *Joachim Milberg*, Dr.-Ing. Dr.h.c. Dr.-Ing. E.h., Professor für Maschinenbau und Produktionswissenschaften, München, Präsident des acatech, Konvent der Technikwissenschaften an der Union der deutschen Akademien.
- 2005 *Klaus von Klitzing*, Dr.rer.nat. Dr.h.c.mult., Professor für Festkörperphysik, Universität Stuttgart, Direktor des Max-Planck-Instituts für Festkörperphysik, Stuttgart

## **Mitgliederverzeichnis (Stand 31.12.2005)**

### **Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft**

Fallersleber-Tor-Wall 16, 38100 Braunschweig  
Telefon: (0531) 1 44 66 · Telefax: (0531) 1 44 60  
E-Mail: [Poststelle@bwg.niedersachsen.de](mailto:Poststelle@bwg.niedersachsen.de)  
Homepage: <http://www.bwg-niedersachsen.de>

*Präsident:* Prof. Dr.rer.nat. Dr.h.c. Joachim Klein  
(bis 31.12.2007)  
*Generalsekretär:* Prof. Dr.med. Dr.phil. Claus-Artur Scheier  
(bis 31.12.2006)  
*Geschäftsstelle:* Frau Hannelore Haubold (Büroleiterin)  
Frau Gabriele Petersen

### **Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften**

*Vorsitzender:* Prof. Dr.rer.nat., Dr.h.c. Ekkehard Winterfeldt (bis 31.12.2006)

#### *Ordentliche Mitglieder*

Bahadır, Müfit (13.11.1947), Dr.rer.nat. Dr.agr.habil. Dr.h.c., Prof. (Ökologische Chemie und Abfallanalytik, TU Braunschweig), Lützenstraße 6, 38124 Braunschweig  
Behrens, Peter (29.6.1957), Dr.rer.nat., Prof. (Anorganische Chemie, Universität Hannover), Danziger Ring 5, 30900 Wedemark-Mellendorf  
Blöchl, Peter (24.6.1959), Dr.rer.nat., Prof. (Theoretische Physik, TU Clausthal), Dr.-Nieper-Straße 13, 38640 Goslar  
Brandes, Dietmar (12.3.1948), Dr.rer.nat. habil., Prof. u. Dir. (Botanik, Universitätsbibliothek, TU Braunschweig), Allerstraße 7, 38106 Braunschweig  
Braß, Helmut (22.2.1936), Dr.rer.nat., Prof. (Angewandte Mathematik, TU Braunschweig), Hilsstraße 26, 38122 Braunschweig  
Deutsch, Werner (4.8.1947), Dr.rer.nat., Prof. (Psychologie, TU Braunschweig), Steintorwall 12, 38100 Braunschweig

- Ehrich, Hans-Dieter (2.2.1943), Dr.rer.nat., Prof. (Informatik, TU Braunschweig), Mannheimstraße 66, 38112 Braunschweig
- Ertmer, Wolfgang (13.2.1949), Dr.rer.nat., Prof. (Experimentalphysik, Universität Hannover), Granatstraße 24, 30823 Garbsen
- Gericke, Karl-Heinz (3.6.1951), Dr.phil.nat., Prof. (Physikalische Chemie, TU Braunschweig), Mühlenweg 12, 38122 Braunschweig
- Glaßmeier, Karl-Heinz (28.4.1954), Dr.rer.nat., Prof. (Geophysik, TU Braunschweig), Friedrich-Löffler-Weg 13, 38116 Braunschweig
- Göbel, Ernst Otto (24.3.1946), Dr.rer.nat., Prof. u. Präs. (Experimentalphysik, PTB Braunschweig), Oscar-Fehr-Weg 16, 38116 Braunschweig
- Görlitzer, Klaus (29.7.1940), Dr.rer.nat., Prof. (Pharmazeutische Chemie, TU Braunschweig), Waterloostraße 15, 38106 Braunschweig
- Harborth, Heiko (11.2.1938), Dr.rer.nat., Prof. (Mathematik, TU Braunschweig), Bienroder Weg 47, 38106 Braunschweig
- Hartmann, Thomas (2.2.1937), Dr.rer.nat., Prof. (Pharmazeutische Biologie, TU Braunschweig), Walter-Hans-Schultze-Straße 21, 38116 Braunschweig
- Heidberg, Joachim (30.1.1933), Dr.phil.nat., Prof. (Physikalische Chemie, Universität Hannover), Zuckmayerstraße 9, 30453 Hannover
- Henzler, Martin (18.5.1935), Dr.rer.nat., Prof. (Festkörperphysik, Universität Hannover), Finkenweg 6, 38826 Garbsen OT Schloss Ricklingen
- Hopf, Henning (13.12.1940), Dr.phil., Dr.h.c., Prof. (Organische Chemie, TU Braunschweig), Steinbrecherstraße 9, 38106 Braunschweig
- Hövermann, Jürgen (15.3.1922), Dr.rer.nat., Prof.em. (Geographie, Universität Göttingen), Nelkenweg 10, 37154 Northeim
- Hulek, Klaus (19.8.1952), Dr.rer.nat.habil., Prof. (Mathematik, Universität Hannover), Peiner Weg 17, 31303 Burgdorf
- Jahn, Dieter (1.8.1959), Dr.rer.nat.habil., Prof. (Mikrobiologie, TU Braunschweig), In den Schönen Morgen 14, 38300 Wolfenbüttel
- Jockusch, Brigitte M. (27.9.1939), Dr.rer.nat., Prof. (Zoologie, TU Braunschweig), Wendenstraße 28/29, 38100 Braunschweig
- Kanold, Hans-Joachim (29.7.1914), Dr.rer.nat.habil., Prof.em. (Mathematik, TU Braunschweig), Güldenstraße 41, 38100 Braunschweig
- Klein, Joachim (20.8.1935), Dr.rer.nat., Dr. h.c., Prof. (Makromolekulare Chemie, TU Braunschweig), Hühnerkamp 21, 38104 Braunschweig
- Kowalsky, Hans-Joachim (16.7.1921), Dr.rer.nat., Prof.em. (Mathematik, TU Braunschweig), Am Schiefen Berg 20, 38302 Wolfenbüttel

- Litterst, Fred Jochen (9.12.1945), Dr.rer.nat.habil., Prof. (Experimentalphysik, TU Braunschweig), Nordendorfweg 4 a, 38110 Braunschweig
- Maaß, Günter (7.1.1934), Dr.rer.nat., Prof. u. Dir. (Biophysikalische Chemie, GBF Braunschweig), Im Eichholz 27, 30657 Hannover
- Meijere, Armin de (18.5.1939), Dr.rer.nat., Prof. (Chemie, Universität Göttingen), Brombeerweg 13, 37077 Göttingen
- Mendel, Ralf-Rainer (20.3.1952), Dr.rer.nat.habil. Dr.sc.nat., Prof. (Botanik, TU Braunschweig), Wiesengrund 3, 38542 Leiferde
- Müller, Georg (1.10.1930), Dr.rer.nat., Dr.rer.nat.h.c., Prof.em. (Mineralogie und Petrographie, TU Clausthal), Einersberger Blick 27, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Müller-Goymann, Christel Charlotte (5.12.1951), Dr.rer.nat., Prof. (Pharmazeutische Technologie, TU Braunschweig), Am Rübenberg 16, 38104 Braunschweig
- Pott, Richard (8.7.1951), Dr.rer.nat., Prof. (Geobotanik, Landschaftsökologie, Universität Hannover), Waldersee Straße 19, 30177 Hannover
- Richter, Egon (24.3.1928), Dr.rer.nat., Prof.em. (Theoretische Physik, TU Braunschweig), Sommerlust 33, 38118 Braunschweig
- Richter, Otto (3.8.1946), Dr.rer.nat.habil., Prof. (Agrarökologie, TU Braunschweig), Kreuzwinkel 22, 38527 Meine-Abbesbüttel
- Rieger, Georg Johann (16.8.1931), Dr.rer.nat., Prof. (Mathematik, Universität Hannover), Rosenstraße 2, 31311 Uetze
- Röhrs, Manfred (22.9.1927), Dr.rer.nat., Prof. (Zoologie, Tierärztliche Hochschule Hannover), Im Dorffeld 43, 30966 Hemmingen
- Schätzl, Ludwig (17.1.1938), Dr.oec.publ., Prof. und Präsident (Wirtschaftsgeographie, Universität Hannover), Im Eichholz 49, 30657 Hannover
- Schaumann, Ernst (16.9.1943), Dr.rer.nat., Prof. (Organische Chemie, TU Clausthal), An der Trift 4 a, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Scheper, Thomas (29.3.1956), Dr.rer.nat., Prof. (Technische Chemie, Universität Hannover), Lange-Hop Straße 47 B, 30559 Hannover
- Schmidt, Gudrun (11.3.1943), Dr.rer.nat.habil., Prof. (Technische Chemie, Technische Universität Clausthal), Schillerstraße 14 b, 37520 Osterode
- Schügerl, Karl (22.6.1927), Dr.rer.nat., Dr.h.c., Prof.em. (Technische Chemie, Universität Hannover), Arnumer Kirchstraße 31, 30966 Hemmingen
- Schwink, Christoph (20.3.1928), Dr.rer.nat., Prof.em. (Physik, TU Braunschweig), Spitzwegstraße 21, 38106 Braunschweig

- Stahl, Wolfgang (17.8.1935), Dr.rer.nat., Prof. u. Dir. (Isotopengeochemie und -geophysik, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover), Hermann-Löns-Weg 14, 30938 Burgwedel
- Steudel, Andreas (17.2.1925), Dr.rer.nat., Prof. (Physik, Universität Hannover), Hahnensteg 41 C, 30549 Hannover
- Vollmar, Roland (1.11.1939), Dr.-Ing., Prof. (Informatik, Universität Karlsruhe), Wendtstraße 10, 76185 Karlsruhe
- Weinert, Hanns Joachim (26.1.1927), Dr.phil. et rer.nat.habil., Prof. (Mathematik, TU Clausthal), Glückaufweg 6, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Welling, Herbert (1.9.1929), Dr.rer.nat., Prof. (Physik, Universität Hannover), Nogatweg 13, 30916 Isernhagen
- Werner, Reinhard F. (26.3.1954), Dr.rer.nat., Prof. (Theoretische Physik, TU Braunschweig), Gerhart-Hauptmann-Straße 1, 38304 Wolfenbüttel
- Willerding, Ulrich (8.7.1932), Dr.rer.nat., apl. Prof. (Botanik, Universität Göttingen), Calsowstraße 60, 37085 Göttingen
- Winterfeldt, Ekkehard (13.5.1932), Dr.rer.nat., Dr.h.c., Prof. (Organische Chemie, Universität Hannover), Sieversdamm 34, 30916 Isernhagen
- Zinner, Gerwalt (30.9.1924), Dr.phil. Dr.rer.nat.h.c., Prof.em. (Pharmazeutische Chemie, TU Braunschweig), Am Papenholz 14, 38104 Braunschweig

*Korrespondierende Mitglieder:*

- Bürger, Hans, Dr.rer.nat., Prof. (Anorganische Chemie, Bergische Universität Wuppertal), Kruppstraße 230, 42113 Wuppertal
- Engelhardt, Wolf Freiherr von, Dr.phil., Prof.em. (Mineralogie und Petrographie, Universität Tübingen), Wilhelmstraße 56, 72074 Tübingen
- Ertl, Gerhard, Dr.rer.nat., Dr.h.c., Prof. u. Dir. (Physikalische Chemie, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft), Garystraße 18, 14195 Berlin
- Fejes Tóth, László, Dr., Prof. (Mathematik, Hungarian Academy of Sciences), Realtanoda U. 13 - 15, H-1053 Budapest/Ungarn
- Haken, Hermann, Dr.rer.nat., Dr.h.c.mult., Prof. (Theoretische Physik, Universität Stuttgart), Sandgrubenstraße 1, 71063 Sindelfingen
- Keßler, Franz Rudolf, Dr.phil., Prof.em. (Physik, TU Braunschweig), Am Krausberg 12, 52351 Düren
- Kippenhahn, Rudolf, Dr.rer.nat., Prof. u. Dir. (Astrophysik, MPI für Physik und Astrophysik), Rautenbreite 2, 37077 Göttingen

Krätschmer, Wolfgang, Dr.rer.nat., Honorarprofessor (Kernphysik, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg und Universität Heidelberg), Pfarrgasse 17 a, 69251 Gaiberg

Kuhn, Hans, Dr.phil., Dr.rer.nat.h.c.mult., Prof. u. Dir. i. R. (Biophysikalische Chemie, MPI Göttingen), Ringoldswilstraße 50, CH-33656 Tschingel ob Gunten/Schweiz

Mensching, Horst, Dr.rer.nat., Prof.em. (Geographie, Universität Hamburg), Pulverhofsweg 46, 22159 Hamburg

Meschede, Dieter, Dr.rer.nat., Prof. (Angewandte Physik, Universität Bonn), Wegeler Straße 8, 53115 Bonn

Schaller, Friedrich, Dr.rer.nat., Prof. (Zoologie, Universität Wien), Regenweg 1/14/3, A-1170 Wien /Österreich

Schwab, Klaus, Dr.rer.nat., Prof. (Geologie und Paläontologie, TU Clausthal), Berliner Straße 119, 38678 Clausthal-Zellerfeld

Scriba, Christoph J., Dr.rer.nat., Prof. (Geschichte der Naturwissenschaften, Universität Hamburg), Bellevue 23, 22301 Hamburg

Tietz, Horst, Dr.phil., Prof.em. (Mathematik, Eilenriede-Stift, Haus B 412), Bevenserweg 10, 30625 Hannover

Voigt, Hans-Heinrich, Dr.rer.nat., Prof.em. (Astronomie und Astrophysik, Universität Göttingen), Charlottenburger Straße 19, 37085 Göttingen

Voronkov, Michael Gregor, Dr.rer.nat., Dr.h.c., Prof. u. Dir. (Chemie, A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry), 1 Favorsky Street, GUS-664033 Irkutsk

Wandrey, Christian, Dr.rer.nat., Prof. u. Dir. (Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut 2), Wolfshovener Straße 139, 52428 Jülich

Witting, Hermann, Dr.rer.nat.habil., Dr.rer.nat.h.c., Prof. (Mathematik, Universität Freiburg), Anemonenweg 3, 79107 Freiburg

### **Klasse für Ingenieurwissenschaften**

*Vorsitzender:* Prof. Dr.-Ing. Manfred Lindmayer (bis 31.12.2005)

*Ordentliche Mitglieder:*

Barke, Erich (28.12.1946), Dr.-Ing.habil, Prof. (Mikroelektronische Systeme, Universität Hannover), Callinstraße 48, 30167 Hannover

Beck, Hans-Peter (27.11.1947), Dr.-Ing., Prof. (Grundlagen der Elektrotechnik und Elektrische Energietechnik, TU Clausthal), Obere Trift 14, 38640 Goslar

- Bohnet, Matthias (20.7.1933), Dr.-Ing., Prof. (Verfahrens- und Kerntechnik, TU Braunschweig), Otto-Hahn-Straße 45, 38116 Braunschweig
- Buchwald, Konrad (16.2.1914), Dr.phil.nat.habil., Prof.em. (Landespflege, Universität Hannover), Große Heide 33, 30657 Hannover
- Budelmann, Harald (6.5.1952), Dr.-Ing., Prof. (Baustoffkunde und Stahlbetonbau, TU Braunschweig), Schneekoppweg 1, 38302 Wolfenbüttel
- Büttgenbach, Stephanus (25.1.1945), Dr.rer.nat., Prof. (Mikrotechnik, TU Braunschweig), Dr.-Bockemüller-Ring 33, 38173 Sickinge
- Carlowitz, Otto (24.06.1949), Dr.-Ing., Prof. u. Geschäftsführer (Umweltwissenschaften, TU Clausthal, Cutec-Institut Clausthal), Am Dammgraben 1, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Dizioğlu, Bekir (13.12.1920), Dr.-Ing., Prof.em. (Getriebelehre und Maschinendynamik, TU Braunschweig), App. 512/514, Säntis, Eichhornstraße 56, 78464 Konstanz
- Duddeck, Heinz (14.5.1928), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Prof. (Statik, TU Braunschweig), Greifswaldstraße 38, 38124 Braunschweig
- Ernst, Rolf (23.8.1955), Dr.-Ing., Prof. (Datentechnik und Kommunikationsnetze, TU Braunschweig), Ellernbruch 12 b, 38112 Braunschweig
- Eßlinger, Maria (4.3.1913), Dr.-Ing., apl. Prof. (Statik, DLR Braunschweig), Bussardweg 2, 38108 Braunschweig
- Haeßner, Frank (6.1.1927), Dr.rer.nat., Prof.em. (Werkstoffkunde und Herstellungsverfahren, TU Braunschweig), Julius-Leber-Straße 46, 38116 Braunschweig
- Heipke, Christian (5.4.1961), Dr.-Ing.habil., Prof. (Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Hannover), Sudetenstraße 16, 30559 Hannover
- Henn, Walter (20.12.1912), Dr.-Ing., Dr.techn.h.c., Dr.-Ing.E.h., Prof.em. (Baukonstruktionen und Industriebau, TU Braunschweig), Ramsachleite 13, 82418 Murnau
- Herrenberger, Justus (27.5.1920), Dr.-Ing., Prof.em. (Baukonstruktionen, TU Braunschweig), Ginsterweg 22, 38126 Braunschweig
- Hesselbach, Jürgen (2.11.1949), Dr.-Ing. Dr.h.c., Prof. und Präsident (Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Braunschweig), Wendessener Straße 4, 38300 Wolfenbüttel
- Jeschar, Rudolf (17.6.1930), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Prof. (Energieverfahrenstechnik, TU Clausthal), Roseneck 1, 38640 Goslar



- Kind, Dieter (5.10.1929), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Honorarprof. u. Präs. i.R. (Hochspannungstechnik, TU Braunschweig und PTB Braunschweig), Knappstraße 4, 38116 Braunschweig
- Konecny, Gottfried (17.6.1930), Dr.-Ing., Dr.h.c.mult., Prof. (Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover), Wartheweg 22, 30559 Hannover
- Kordina, Karl (7.8.1919), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Prof.em. (Stahlbeton- und Massivbau, TU Braunschweig), Im Heidekamp 13, 38112 Braunschweig
- Kose, Volkmar (30.3.1936), Dr.rer.nat., Honorarprof. (Präzisionsmeßtechnik, TU Braunschweig, PTB Braunschweig), Nernstweg 9, 38116 Braunschweig
- Kowalsky, Wolfgang (23.3.1958), Dr.-Ing.habil., Prof. (Hochfrequenztechnik, TU Braunschweig), Dorothea-Erxleben-Straße 41 b, 38116 Braunschweig
- Lautz, Günter (15.11.1923), Dr.rer.nat., Prof.em. (Elektrophysik, TU Braunschweig), Fallsteinweg 97, 38302 Wolfenbüttel
- Leilich, Hans-Otto (28.11.1925), Dr.-Ing., Prof.em. (Datenverarbeitungsanlagen, TU Braunschweig), Am Schiefen Berg 61 a, 38302 Wolfenbüttel
- Leonhard, Werner (25.5.1926), Dr.-Ing., Dr.h.c., Prof.em. (Regelungstechnik, TU Braunschweig), Am Schiefen Berg 54, 38302 Wolfenbüttel
- Lindmayer, Manfred (4.10.1941), Dr.-Ing., Prof. (Elektrische Energieanlagen, TU Braunschweig), Am Papenholz 15, 38104 Braunschweig
- Mahrenholtz, Oskar (17.5.1931), Dr.-Ing., Prof.em. (Mechanik, TU Hamburg-Harburg), Hermann-Löns-Weg 17 f, 21220 Seevetal
- Marx, Claus (21.8.1931), Dr.-Ing., Dr.h.c., Prof. (Tiefbohrkunde und Erdölgewinnung, TU Clausthal), Am Stollen 18, 38640 Goslar
- Matthies, Hans Jürgen (6.11.1921), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Prof.em. (Landmaschinen, TU Braunschweig), Wöhlerstraße 15, 38116 Braunschweig
- Mecke, Wilhelm (12.8.1907), Dr.-Ing., Prof.em. (Straßenwesen und Erdbau, TU Braunschweig), Pascheburging 8, 37154 Northeim
- Merker, Günter Peter (9.4.1942), Dr.-Ing.habil., Prof. (Thermodynamik und Kältetechnik, Universität Hannover), Deichstraße 23, 30823 Garbsen
- Mitschke, Manfred (5.5.1929), Dr.-Ing., Prof. (Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig), Buchfinkweg 1, 38112 Braunschweig
- Möller, Dietrich (18.12.1927), Dr.-Ing., Prof.em. (Vermessungskunde, TU Braunschweig), Steinkamp 6, 38165 Lehre

- Mühlbauer, Alfred (9.11.1932), Dr.-Ing. Dr.h.c., Prof. (Elektrowärme, Universität Hannover), Westerfeldweg 44, 30900 Wedemark
- Musmann, Hans-Georg (14.8.1935), Dr.-Ing., Prof. (Nachrichtentechnik, Universität Hannover), Heckenrosenweg 24, 38259 Salzgitter
- Peil, Udo (20.4.1944), Dr.-Ing., Prof. (Stahlbau, TU Braunschweig), Försterkamp 9, 38302 Wolfenbüttel
- Pelzer, Hans (20.1.1936), Dr.-Ing., Prof. (Vermessungskunde, Universität Hannover), An der Worth 26, 30966 Hemmingen
- Popp, Karl (14.8.1942), Dr.-Ing., Prof. Prof. E.h. (Mechanik, Universität Hannover), Sauerbruchweg 49, 31535 Neustadt/Rbge.
- Reimers, Ulrich (23.3.1952), Dr.-Ing., Prof. (Nachrichtentechnik, TU Braunschweig), Kollwitzstraße 28, 38159 Vechelde
- Rostásy, Ferdinand Stefan (4.5.1932), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Prof. (Baustoffe und Stahlbetonbau, TU Braunschweig), Nietzschestraße 26, 38126 Braunschweig
- Rothert, Heinrich (5.12.1938), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Prof. (Statik, Universität Hannover), Feldbrunnenstraße 15, 20148 Hamburg
- Scheer, Joachim (5.3.1927), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Prof.em. (Stahlbau, TU Braunschweig), Wartheweg 20, 30559 Hannover
- Schnieder, Eckehard (7.2.1949), Dr.-Ing., Prof. (Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, TU Braunschweig), Friedrich-Knoll-Straße 3, 38104 Braunschweig
- Schönfelder, Helmut (3.4.1926), Dr.-Ing., Prof.em. (Nachrichtentechnik, TU Braunschweig), Fürstenhofweg 1 A, 38667 Bad Harzburg
- Schulitz, Helmut C. (17.7.1936), Dipl.-Ing., M.Arch., Arch.BDA, Hon.FAIA, Prof. (Architektur, TU Braunschweig), Am Dahlumer Holze 27, 38126 Braunschweig
- Schwedes, Jörg (26.2.1938), Dr.-Ing., Prof. (Verfahrenstechnik, TU Braunschweig), Fasanenstraße 17, 38102 Braunschweig
- Schwerdtfeger, Klaus (16.9.1934), Dr.-Ing., Prof. (Allgemeine Metallurgie, TU Clausthal), Zeppelinstraße 28, 38640 Goslar
- Siefer, Thomas Bernhard (5.3.1955), Dr.-Ing., Prof. (Eisenbahnbetriebswissenschaft, Verkehrsökonomie, Universität Hannover), Süßeroder Straße 10, 30559 Hannover
- Stein, Erwin (5.7.1931), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Dr.h.c.mult., Prof.em. (Baumechanik, Universität Hannover), Am Ortfelde 124, 30916 Isernhagen

- Thoma, Manfred (24.2.1929), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Dr.h.c., Prof. (Regelungstechnik, Universität Hannover), Westermannweg 7, 30419 Hannover
- Tönshoff, Hans Kurt (14.5.1934), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h.mult. Dr.h.c., Prof. (Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen, Universität Hannover), Bruchholzwiesen 10, 30938 Burgwedel
- Unger, Hans-Georg (14.9.1926), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h.mult, Dr.rer.nat.h.c., Prof.em. (Hochfrequenztechnik, TU Braunschweig), Wöhlerstraße 10, 38116 Braunschweig
- Weh, Herbert (1.3.1928), Dr.-Ing., Dr.sc.techn.h.c., Prof. (Starkstromtechnik, TU Braunschweig), Kirchplatz 12, 87534 Oberstaufen
- Wiendahl, Hans-Peter (11.2.1938), Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Prof. (Arbeitsmaschinen und Fabrikanlagen, Universität Hannover), Am Winkelberge 6, 30826 Garbsen
- Wriggers, Peter (3.2.1951), Dr.-Ing., Prof. (Baumechanik und Numerische Mechanik, Universität Hannover), Bödekerstraße 8, 30161 Hannover
- Zabeltitz, Christian von (7.8.1932), Dr.-Ing., Prof. (Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover), Hellwiesen 3, 30900 Wedemark
- Zenner, Harald (8.7.1938), Dr.-Ing., Prof. (Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, TU Clausthal), Narzissenhang 1, 01328 Dresden
- Zielke, Werner (8.12.1937), Dr.-Ing., Prof. (Strömungsmechanik, Universität Hannover), Lönsweg 31, 30826 Garbsen

*Korrespondierende Mitglieder:*

- Baehr, Hans-Dieter, Dr.-Ing., Dr.E.h., Prof. (Thermodynamik, Universität Hannover), Dürerstraße 9, 44795 Bochum
- Bjerhammer, Arne, tekn.dr., Prof. (Geodäsie, Kungl. Tekniska Högskolan Stockholm) Schweden
- Funke, Paul, Dr.-Ing., Prof. (Werkstoffumformung, TU Clausthal), Arnikaweg 12, 38678 Clausthal-Zellerfeld
- Garbrecht, Günther, Dr.-Ing., Dr.sc.h.c., Prof.em. (Wasserbau, Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, TU Braunschweig), Drosselweg 15, 38179 Schwülper
- Gersten, Klaus, Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Prof. (Thermo- und Fluidodynamik, Universität Bochum), Hofleite 15, 44795 Bochum
- Gilles, Ernst Dieter, Dr.-Ing. Dr.h.c.mult., Direktor (Mess- und Regelungstechnik, MPI Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg), Bauernwaldstraße 131, 70195 Stuttgart

- Hofmann, Wilhelm, Dr.-Ing., Prof.em. (Baukonstruktion und Entwerfen, Universität Hannover), Wohnstift Augustinum, App. 5513, Renteillichtung 8, 45134 Essen
- Kärner, Hermann Christian, Dr.-Ing., Dr.h.c., Prof. (Hochspannungstechnik, TU Braunschweig), Lessingstraße 10 a, 94575 Windorf
- Kistenmacher, Hans, Dr.rer.pol., Prof. (Regional- und Landesplanung, Universität Kaiserslautern), Friedrich-Ebert-Straße 1, 67271 Neuleiningen
- Krätzig, Wilfried B., Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Prof. (Statik und Dynamik/Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum), Wagenfeldstraße 8 A, 58456 Witten
- Kreuzer, Edwin, Dr.-Ing.habil., Prof. (Mechanik und Meerestechnik, TU Hamburg-Harburg), Gerlachstraße 12, 21075 Hamburg
- Mayinger, Franz, Dr.-Ing., Prof. (Verfahrenstechnik, TU München), Am Haselnußstrauch 18, 80935 München
- Menn, Christian, Prof.em. Dr.-Ing. Dr.-Ing.E.h. (Konstruktiver Ingenieurbau, ETH Zürich), Plantaweg 21, 7000 Chur Schweiz
- Milberg, Joachim, Dr.-Ing. Dr.h.c.mult. Dr.-Ing.E.h., Prof. u. Präs. (Maschinenbau und Produktionswissenschaften, acatech, Konvent der Technikwissenschaften an der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.), Residenz München, Hofgartenstraße 2, 80539 München
- Moritz, Helmut, Dr.techn., Dr.-Ing.E.h., Prof. (Erdmessung und Physikalische Geodäsie, TU Graz), Maria-Troster-Straße 114, A-8043 Graz/Österreich
- Pierick, Klaus, Dr.-Ing., Prof. (Verkehr, Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung, TU Braunschweig), Am Uhlenbusch 31, 38108 Braunschweig
- Ramm, Ekkehard, Dr.-Ing.habil. Dr.-Ing. E.h. Dr.h.c., Prof. (Baustatik, Computer orientierte Strukturmechanik, Universität Stuttgart), Sperberweg 31, 71032 Böblingen
- Ruge, Jürgen, Dr.-Ing., Prof.em. (Schweißtechnik und Werkstofftechnologie, TU Braunschweig), Waldstraße 16, 82110 Germering
- Schlitt, Herbert, Dr.phil.nat., Prof. (Regelungstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg), Egerlandstraße 5, 91058 Erlangen
- Spengelin, Friedrich, Dipl.-Ing., Prof. (Städtebau, Universität Hannover), Habichtshorststraße 12, 30655 Hannover
- Steck, Elmar, Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Prof. (Mechanik, TU Braunschweig), Mauernstraße 12, 38312 Börssum/Bornum
- Stracke, Ferdinand, Dipl.-Ing., Prof. (Städtebau und Regionalplanung, TU München), Karlstraße 43/II, 80333 München

- Torge, Wolfgang, Dr.-Ing., Prof. (Theoretische Geodäsie, Universität Hannover), Mönchekamp 4 A, 30457 Hannover
- Truckenbrodt, Erich, Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h., Prof.em. (Strömungsmechanik, TU München), Josef-Würth-Straße 12, 82031 Grünwald
- Weimann, Günter, Dr.-Ing., Prof.em. (Photogrammetrie und Kartographie, TU Braunschweig), Knupfertal 40, 89520 Heidenheim
- Zerna, Wolfgang, Dr.-Ing., Prof.em. (Konstruktiver Ingenieurbau, Universität Bochum), Am Wittenstein, 45527 Hattingen
- Zumpe, Günter, Dr.-Ing.habil., Dr.h.c., Prof. (Mechanik, TU Dresden), Knoopstraße 7, 01326 Dresden

### **Klasse für Geisteswissenschaften**

*Vorsitzender:* Prof. Dr.phil.habil. Hans-Joachim Behr (bis 31.12.2007)

#### *Ordentliche Mitglieder:*

- Alpers, Klaus (27.9.1935), Dr.phil., Prof. (Klassische Philologie, Universität Hamburg), Kolberger Straße 12, 21339 Lüneburg
- Behr, Hans-Joachim (18.1.1949), Dr.phil.habil., Prof. (Ältere deutsche Sprache und Literatur, TU Braunschweig), Steige 8, 38102 Braunschweig
- Boeder, Heribert (17.11.1928), Dr.phil., Prof. (Philosophie, Universität Osnabrück), Lönsweg 10, 49076 Osnabrück
- Conermann, Klaus (1.10.1941), Dr. phil., Prof.em. (Germanistik (Neuere deutsche Literatur), Sächsische Akademie der Wissenschaften „Fruchtbringende Gesellschaft“), Schlossplatz 18, 38304 Wolfenbüttel
- Cunz, Reiner (12.4.1958), Dr.phil., Nds. Landesnumismatiker, Wiss. Leiter des Nds. Münzkabinetts der Deutschen Bank (Numismatik, Landesmuseum Hannover), Hunaeusstraße 5, 30177 Hannover
- Daniel, Ute (3.5.1953), Dr.phil, Prof. (Neuere Geschichte, TU Braunschweig), Wendenmaschstraße 7, 38100 Braunschweig
- Fritz, Wolfgang (12.7.1951), Dr.rer.pol.habil., Prof. (Betriebswirtschaftslehre, TU Braunschweig), Rebenstraße 89, 64646 Heppenheim
- Gahl, Klaus P. G. (14.6.1937), Dr.med., Prof. u. Chefarzt a.D. (Innere Medizin, Medizinische Klinik II am Städtischen Klinikum Braunschweig), Dürerstraße 10, 38106 Braunschweig

- Henne, Helmut (5.4.1936), Dr.phil., Prof. (Germanistische Linguistik, TU Braunschweig), Platanenstraße 27, 38302 Wolfenbüttel
- Hentze, Joachim (23.6.1940), Dr.rer.pol.habil. Dr.h.c., Prof. (Betriebswirtschaftslehre: Unternehmensführung, TU Braunschweig), Brachvogelweg 4, 30916 Isernhagen
- Kühne, LL.M., Gunther (25.8.1939), Dr.jur., Prof. (Berg- und Energierecht, TU Clausthal), Geheimrat-Ebert-Straße 1, 38640 Goslar
- Lohse, Eduard (19.2.1924), Dr.theol.D., Honorarprof. u. Landesbischof i. R. (Ev.-luth. Landeskirche Hannover), Ernst-Curtius-Weg 7, 37075 Göttingen
- Märtl, Claudia (3.7.1954), Dr.phil.habil., Prof. (Mittelalterliche Geschichte, Universität München), Preysingstraße 29, 81667 München
- Meckseper, Cord (29.10.1934), Dr.-Ing.habil., Prof. (Bau- und Kunstgeschichte, Universität Hannover), Eisenacher Weg 4, 30179 Hannover
- Müller, Gerhard (10.5.1929), Dr.theol., D.D., Honorarprof. u. Landesbischof i.R. (Ev.-luth. Landeskirche Braunschweig), Sperlingstraße 59, 91056 Erlangen
- Oberbeck, Gerhard (5.10.1925), Dr.rer.nat., Prof.em. (Geographie und Wirtschaftsgeographie, Universität Hamburg), Ginsterweg 4, 25474 Ellerbek
- Peine, Franz-Joseph (18.8.1946), Dr.jur., Prof. (Öffentliches Recht, Universität Göttingen), Kurpromenade 56, 14089 Berlin
- Pollmann, Klaus Erich (12.9.1940), Dr.phil., Prof. u. Rektor (Neuere Geschichte und Zeitgeschichte, Universität Magdeburg), Glogaustraße 17, 38124 Braunschweig
- Raabe, Paul (21.2.1927), Dr.phil.habil., Dr.h.c.mult., apl. Prof. u. Dir. i.R. (Deutsche Literaturwissenschaft, Universität Göttingen, Herzog August Bibliothek Wolfenbüttel), Roseggerweg 45, 38304 Wolfenbüttel
- Rengeling, Hans-Werner (25.2.1938), Dr.jur., Prof. (Umweltrecht, Universität Osnabrück), Langeworth 143, 48159 Münster
- Rötting M.A., Hartmut (11.8.1932), Honorarprof. (Denkmalpflege, Stadtarchäologie, TU Braunschweig), Lobmachersche Straße 18, 38312 Cramme
- Salje, Peter (8.2.1948), Dr.jur., Dr.rer.pol., Prof. (Rechtswissenschaften, Universität Hannover), Kollenrodtstraße 7, 30161 Hannover
- Scheier, Claus-Artur (8.9.1942), Dr.med., Dr.phil.habil., Prof. (Philosophie, TU Braunschweig), Jasperallee 77, 38102 Braunschweig
- Schindel, Ulrich (10.10.1935), Dr.phil.habil., Prof. (Klassische Philologie, Universität Göttingen), Albert-Schweitzer-Straße 3, 37075 Göttingen

- Schmidt-Glintzer, Helwig (24.6.1948), Dr.phil.habil., Prof. u. Dir. (Sinologie, Allgemeine Kulturwissenschaft, Universität Göttingen, Herzog August Bibliothek Wolfenbüttel), Lessingplatz 1, 38300 Wolfenbüttel
- Schwarz, Brigide (19.1.1940), Dr.phil., Prof. i.R. (Mittelalterliche Geschichte, Universität Hannover), Geibelstraße 2, 12205 Berlin
- Stauf, Renate (23.3.1949), Dr.phil.habil., Prof. (Neuere deutsche Literatur, TU Braunschweig), Kasernenstraße 23, 38102 Braunschweig
- Thieme, Hartmut (20.11.1947), Dr.rer.nat., Leiter d. Archäol. Schwerpunktuntersuchungen im Helmstedter Braunkohlenrevier (Ur- und Frühgeschichte, Nieders. Landesamt f. Denkmalpflege Hannover), Schaumburger Weg 9, 31542 Bad Nenndorf
- Thieme, Werner (13.10.1923), Dr.jur., Prof.em. (Verwaltungslehre, Universität Hamburg), Berggartenstraße 14, 29223 Celle
- Thies, Harmen (26.12.1941), Dr.phil., Prof. (Baugeschichte, TU Braunschweig), Rodeweg 3, 38162 Abbenrode
- Vollmer, Gerhard (17.11.1943), Dr.rer.nat. Dr.phil., Prof. (Philosophie, TU Braunschweig), Zaunkönigweg 5, 38026 Garbsen
- Warncke, Carsten-Peter (21.6.1947), Dr.phil., Prof. (Kunstgeschichte, Universität Göttingen), Schöne Aussicht 59, 34346 Hann. Münden
- Wilhelm, Herbert (8.6.1922), Dr.oec., Prof.em. (Volkswirtschaftslehre, TU Braunschweig), Hirschbergstraße 16, 38124 Braunschweig
- Zahlten, Johannes (25.1.1938), Dr.phil., Prof. (Kunstgeschichte, HBK Braunschweig), Olfermannstraße 11, 38102 Braunschweig

*Korrespondierende Mitglieder:*

- Borst, Arno, Dr.phil., Prof. (Mittelalterliche Geschichte, Universität Konstanz), Längerbohlstraße 42, 78467 Konstanz
- Brett, Michael, Ph.D., Reader in the History of North Africa (Arabisch u. Arabische Geschichte mit besonderer Berücksichtigung Nordafrikas, School of Oriental and African Studies, London), 142 Turney Road, West Dulwich, GB-London SE 21 7 JJ/Groß Britannien
- Burkert, Walter, Dr.phil., Prof. (Klassische Philologie, Universität Zürich), Wildsbergstraße 8, CH-8610 Uster/Schweiz
- Cohen-Mushlin, Aliza, Ph.D., Prof. und Dir. (Jüdische Kunst, Center for Jewish Art, The Hebrew University of Jerusalem), 19 Efrata St., Jerusalem 93384/Israel

- Ehlers, Joachim, Dr.phil., Prof. (Mittelalterliche Geschichte, FU Berlin), Am Wieselbau 9, 14169 Berlin
- Elbern, Victor H., Dr.phil., Accademico dei Lincei, Honorarprof. (Kunstgeschichte, FU Berlin), Ilsesteinweg 42, 14129 Berlin
- Engel Holland, Eva Johanna, Dr.phil., Prof.em. (Germanistik und Romanistik, Wellesley College/USA und Forschungsauftrag DFG Herzog August Bibliothek Wolfenbüttel), Schloßplatz 10, 38304 Wolfenbüttel
- Esch, Arnold, Dr.phil., Prof. u. Dir. i.R. (Mittelalterliche Geschichte, Deutsches Historisches Institut in Rom), Via della Lungara, 18, I-00165 Roma/Italien
- Garrigues, Marie-Odile, Dr.phil., Prof. (Philosophie und Theologie, Centre Nationale de la Recherche Scientifique Paris) , Frankreich
- Hopt, Klaus J., Dr.jur. Dr.phil. Dr.h.c.mult., Prof. u. Dir. (Ausländisches und Internationales Privatrecht, MPI für ausländisches und internationales Privatrecht, Hamburg), Isestraße 117, 20148 Hamburg
- Klibansky, Raymond, Dr.phil., Prof. (Philosophie, Wolfson College, Oxford University) , GB-Oxford OX2 6UD/Großbritannien
- Kloft, Hans, Dr.phil., Prof. (Alte Geschichte und Wirtschaftsgeschichte, Universität Bremen), Wernigeroder Straße 36, 28205 Bremen
- Klüßendorf, Niklot, Dr.phil., apl. Prof. (Numismatik und Geldgeschichte, Philipps-Universität Marburg), Koppelkaute 2, 35287 Amöneburg
- Lavrov, Sergej, Dr., Prof. (Ökonomische Geographie, Universität Sankt Petersburg) , GUS
- Narkiss, Bezalel, Dr.phil., Prof. u. Dir. ( Dep. of Art History, Index of Jewish Art, The Hebrew University Jerusalem), Humanities Building, Mt. Scopus, 91042 Jerusalem/Israel
- Neumann, Günter, Dr.phil., Prof.em. (Sprachwissenschaften, Universität Würzburg), Thüringer Straße 20, 97078 Würzburg
- Oexle, Otto G., Dr.phil., Prof. u. Dir. (Geschichte, MPI für Geschichte, Göttingen), Planckstraße 15, 37073 Göttingen
- Peroni, Adriano, Dr.phil., Prof. (Kunstgeschichte, Universität Florenz), Via Lungo L'Affrico 164, I-50137 Florenz/Italien
- Poeschke, Joachim, Dr.phil., Prof. (Kunstgeschichte, Universität Münster), Rudolf-von-Langen-Straße 26, 48147 Münster
- Rambaldi, Enrico, Dr.phil., Prof. ( Universität Mailand), Via Monte Bianco 36, I-20149 Mailand/Italien



- Rosen, Stanley, Dr.phil., Prof. (Philosophie, Pennsylvania State University),  
USA
- Schneidmüller, Bernd, Dr.phil.habil., Prof. (Mittelalterliche Geschichte,  
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg), Reuthersberg 18, 96135 Stegaurach
- Schwerdtfeger, Gunther, Dr.jur., Prof. (Öffentliches Recht und Recht der sozialen  
Sicherheit, Universität Hannover), Hülsebrinkstraße 23, 30974 Wennigsen  
(Deister)
- Seidensticker, Bernd, Dr.phil., Prof. (Klassische Philologie, Freie Universität  
Berlin), Terrassenstraße 17 a, 14129 Berlin
- Szlezák, Thomas Alexander, Dr.phil., Prof. (Griechische Philosophie, Universität  
Tübingen), Neckarhalde 3, 72070 Tübingen
- Tsujimura, Koichi, Dr.phil., Prof. (Philosophie, Universität Kyoto), Sakyoku,  
Kamitakano, Higashidacho 12, J-606 Kyoto/Japan
- Ullmann, Ernst, Dr.phil.habil., Prof. (Kunstgeschichte, Universität Leipzig),  
Tschaikowskistraße 12, 04105 Leipzig
- Voppel, Götz, (), Dr.rer.pol., Prof. (Wirtschafts- und Sozialgeographie, Universität  
Köln), Neckarstraße 58, 51149 Köln
- Zeitler, Rudolf, Dr.phil., Prof.em. (Universität Uppsala), Regngatan 16, S-75431  
Uppsala/Schweden

